



Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales

**Control Visual de un Vehículo Aéreo
Autónomo Usando Detección y Seguimiento
de Características en Espacios Exteriores**

Tesis Doctoral

Luis O. Mejías Alvarez
Ingeniero en Electrónica

2006



Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales
Universidad Politécnica de Madrid

**Control Visual de un Vehículo Aéreo
Autónomo Usando Detección y Seguimiento
de Características en Espacios Exteriores**

Tesis Doctoral

Autor:

Luis O. Mejías Alvarez

Ingeniero en Electrónica

Director:

Pascual Campoy Cervera

Doctor Ingeniero Industrial

2006

Titulo:
**control visual de un vehículo aéreo
autónomo usando detección y seguimiento de
características en espacios exteriores**

Autor:
Luis O. Mejías Alvarez
Ingeniero en Electrónica

Tribunal

Presidente : Rafael Aralcil Santoja

Vocal : Miguel Angel Salichs

Vocal : Álvaro Sánchez Miralles

Vocal : Roland Siegwart

Secretario : Jose Maria Sebastián y Zuñiga

Realizado el acto de lectura y defensa de la tesis el día 1 de Diciembre de 2006.

El Presidente:

Los Vocales:

El Secretario:

Agradecimientos

En muchas ocasiones me he planteado el cómo escribir una sección de agradecimientos y ser justo con todas aquellas personas a las cuales de alguna u otra manera, les debo lo que soy y lo que he conseguido. A pesar de explícitamente nombrar a muchas de ellas a continuación, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a los que no he incluido.

Un agradecimiento muy especial y en primer lugar a Pascual Campoy por su confianza, por ser guía en la realización de la tesis y ha alentarme en todo momento a ser mejor investigador. A Sergio Dominguez, y a José María Sebastian quien ha contribuido enormemente a que esta tesis se haya realizado, a ellos que han sabido crear un ambiente familiar que hace un placer el pertenecer al Grupo de Visión por Computador de la Universidad Politécnica de Madrid.

A los miembros del DISAM en especial Rafael Aralcil, Agustín Jiménez, Antonio Barrientos, Ernesto Gambao, Ramon Galán, Fernando Matía, Manolo Ferre por ser referentes en investigación y a Teresa Olmos, Rosa Ortiz, Ángel Luis Martínez y Carlos Sánchez por todo el apoyo que siempre han prestado a los doctorandos.

A todos los compañeros de trabajo de los distintos centros de investigación donde he realizado labor investigadora *DISAM*: José San Pedro, Maria Artigas, Maria Scarano, Cristina Sanchez, Nicolas Denis, Pedro Gutierrez, Jaime del Cerro, Cecilia García, Juan Manuel Bogado, Luis Angel Silva, Rodrigo San Martin, Adrian Mora, Alberto Brunete, Diego Lozada, Lizardo Pari, Cesar Alvarez, Eugenio Eyime, Pedro J. Garcia, David García, Monica García, Simon Fischer y a todos aquellos que he olvidado pero que sin duda han contribuido a un incomparable y enviable ambiente de trabajo

en el departamento; *LIU*: Gianpaolo Conte, Piotr Rudol, Mariuz Wzorek y Patrick Doherty; *USC*: Srikanth Saripalli y Gaurav Sukhatme; *CSIRO*: Jonathan Roberts, Kane Usher, Polly Alexander y Peter Corke.

Expreso mi agradecimiento a instituciones como el concejo social de la Universidad Politécnica de Madrid que financieramente hizo posible el optar al doctorado europeo y al Ministerio de Ciencia y Tecnología que a través de una beca de formación de personal investigador (BES-2002-1546) permitió realizar esta tesis doctoral.

Finalmente, y muy importante a mi familia, por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo y su comprensión ante las muchas horas que no les he podido dedicar por este motivo.

Resumen

El objetivo de la presente tesis doctoral ha sido el de diseñar robots aéreos guiados por visión. El uso de sensores visuales en robots aéreos para realizar tareas como evasión de obstáculos, seguimiento de objetivos o detección de características salientes, permite a tales robots servir de visores inteligentes para aplicaciones de inspección, patrullaje y monitoreo, reconstrucción digital aérea, etc. Más aún, el uso de la visión por computador puede reducir la incertidumbre e incrementar la versatilidad y desempeño general cuando se realizan tareas robotizadas. Esta tesis aborda la problemática del control servo visual de un vehículo aéreo autónomo en espacios exteriores, en especial de un helicóptero autónomo. El siguiente trabajo propone técnicas de visión por computador que permiten a un vehículo aéreo realizar maniobras mientras se hace seguimiento de características en entornos donde el GPS tiene fallos de recepción (usualmente en zonas urbanas) o simplemente permiten alinear el vehículo con un objetivo dado. Se investigan técnicas de control servo visual que usan directamente la posición de las características en la imagen para generar referencias de velocidad para control de vuelo, es decir, la tarea se especifica en el espacio de trabajo del sensor. Esta estrategia no requiere procedimientos de calibración de la cámara o reconstrucción 3D de la escena, los cuales están sujetos a errores y demandan una alta capacidad de computacional.

A pesar de que el problema del control visual ha sido bien estudiado para el caso de robots terrestres o robots articulados, no ha sido así para el caso de robots aéreos y en específico en la problemática planteada en esta tesis doctoral. La propuesta de esta tesis doctoral ha sido analizada y validada usando diferentes plataformas de prueba, a través de numerosas pruebas experimentales. Diferentes factores se investigaron los cuales influyen en el rendimiento del sistema, factores como velocidad de procesamiento, vibra-

ciones, estrategias de control, y condiciones ambientales tales como iluminación, cambios de texturas, etc. Experimentos hechos en un helicóptero autónomo muestran que la estrategia puede ser usada para controlar los desplazamientos verticales, horizontales y longitudinales de este vehículo, y de manera similar seguir visualmente un objetivo y guiar la trayectoria del helicóptero.

Abstract

The main goal of this thesis is to build vision-guided autonomous flying robots. Tasks like feature detection, target tracking, obstacle avoidance using vision sensors allows such robots to serve as intelligent eyes-in-the-sky suitable for numerous applications including law enforcement, search and rescue, aerial mapping and inspection, and movie making. Furthermore, computer vision may reduce uncertainty and increase versatility and overall accuracy of robotic tasks which are important concerns in most applications. We address the visual servoing problem for an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in outdoor environments, specifically an autonomous robotic helicopter. We propose vision-based techniques which allow an UAV to perform maneuvers towards features of interest when GPS has dropouts (usually in urban areas) or to track a target. We investigate visual servo control techniques that use velocities of suitable image features parameters directly to compute the references for the flight control for driving the robot, i.e, the tasks is specified directly in the sensor workspace. Therefore, the strategy does not require camera calibration procedures or 3D scene reconstruction schemes which are subject to errors and demand high processing power.

Although visual servoing is a well studied problem for ground-based robots or robotics manipulators operating in 2D environments, is not well studied for the visual control problem of an UAV such as the one proposed in this thesis. The approach proposed here was analyzed and validated using several experimental tests on different platforms. We investigate a number of factors that influence the performance of the system including processing frame rate, vibrations, control strategies and environmental conditions such as light and luminance, background changes, etc. Experiments on the real autonomous helicopter show that visual servoing approach can be used to

control the displacements of an autonomous helicopter vertically, laterally and longitudinally, and can be used to both, track an external target and guide the UAV trajectory.

Context and motivations

UAVs (unmanned aerial vehicles) have been an active area of research in recent years. Their use in civilian applications for surveillance and inspection continues to grow due in part to the emergence of cheap low-power vision systems. Vision for flight control encompasses a broad range of research areas such as object detection and tracking, position estimation, sensor fusion with inertial navigation and GPS, and multivariable non-linear system modeling and control.

An autonomous helicopter is highly suitable for tasks like inspection and surveillance. The inherent ability of the helicopter to fly at low speeds, however, fly laterally and perform maneuvers in narrow spaces makes it an ideal platform for such tasks. These abilities are particularly useful in structured environments where the features that are to be tracked are very well understood. The structured nature of features facilitates vision-based state estimation and control.

The approach presented in this thesis combines computer vision with low-level control to achieve precise vision based feature tracking for an unmanned model helicopter. The vision-based system described here acts as an overall controller sending navigational commands to the flight controller which is responsible for robust autonomous flight. The result is an algorithm for vision-based tracking of features using an autonomous helicopter in outdoors or structured environment.

Challenges of visual control for UAV

Although a helicopter has many advantages for certain tasks, it has the drawback of being very hard to control. Helicopters are by nature unstable multivariable non-linear systems, and the low-level stability control needs to deal with these characteristics. If an autonomous helicopter fails to receive stabilizing control commands for even a brief period, it will most likely become unstable and crash. This makes conducting research on an autonomous helicopter very challenging. There is little room for error, and when things go wrong the results can be catastrophic. For ground-based mobile robots or serial robotics manipulators, basic visual servo control is a well studied problem with a number of contributed solutions, but for flying robots many challenges still remain. The problem is greater because flying robots operate in 3D-space as opposed to the 2D surface that ground robots navigate on. Since small to medium scale UAVs have limited payload capabilities, they are rarely able to carry the types of sensors that are typically used in ground robots.

Computer vision provides a natural sensing modality for feature detection and tracking on UAVs, as cameras are light and power efficient. With the increasing miniaturization of CCD cameras, vision even offers the potential to be used on Micro Air Vehicles (MAVs). Also, unlike a scanning type sensor, cameras take an almost instantaneous snapshot of the environment, which is beneficial on a dynamic platform. Using vision outdoors is notoriously difficult because of varying lighting conditions. Even if the lighting is favorable and the scene can be captured accurately in an image, there is the problem of making sense of the image and extracting information such as the distance to features. As humans, we take for granted how well our vision system works. We are easily able to make sense of a scene and judge the distance to features around us. For a computer, this is not the case. After more than three decades of computer vision research, many techniques have been developed which can enable a machine to sense motion in an image sequence and get 3D information of its environment. Even so, this

can hardly be compare to the information that the human vision system provides us with, both in terms of level of detail and accuracy. Cameras generate data that are sparse, and are prone to noise.

Overview of the proposed approach

In this dissertation we approach the problem considering the strength of an autonomous helicopter fusing it with a computer vision system for control and maneuver the helicopter using feature tracking. Using the techniques we have developed or implemented which are described in this dissertation, an autonomous helicopter is able to demonstrate the following capabilities:

- Perform vision-based 2D displacement, tracking features in the image plane and uses the location of these features to control the helicopter maneuvers in 2D, i.e, in two of the three degrees of freedom in translation.
- Using two camera configurations the helicopter can be visually guided laterally and vertically, and laterally and longitudinally, respectively

We consider the problem decoupling the low level control of the helicopter from the vision system. We assume the low-level control will keep the helicopter stable, and our higher-level control treats it as a floating body which can be controlled by giving it velocity references and turn rate commands.

The visual control system proposed in this thesis use several existing techniques for detecting salient features in the image and to track them along the image sequence. We focus on bringing these techniques together in a novel way to form a working platform. We therefore emphasize the point that this thesis has been largely validated through a number of experimental work.

Problem statement

The problem of 2D visual servoing of an autonomous helicopter can be described as follow:

- **Development of a vision system**, this can be subdivided further into 1) Design the suitable hardware to perform onboard visual processing
2) Develop the software architecture for exchange messages with the helicopter and ground-based processes.
- **Algorithm for feature detection and tracking**, given a specific task. Analyze different scenarios and tasks, and then design or choose the most suitable feature detection and tracking approach.
- **Integrate the visual information with flight control**, define the schema in which the vision-based references are integrated with the flight controller.

Contributions

The significant contributions of this thesis are as follows:

- **Flight control architecture for its integration with visual information**

The visual control system and its visual references are integrated with the flight control through a high level layer using UDP messages. This layer acts as a switch using the API communication explained in the next item. The low-level controller is based on simple PID loops and ensures the stability of the helicopter. This controller has been validated empirically. The higher level controller uses various sensing modalities such as GPS and/or vision to perform tasks such as navigation, landing, visual tracking, etc.

■ **A software architecture for purposeful visual servoing of UAV.**

We implement an existing architecture such as client-server. This architecture is based on TCP/UDP messages which allows embedded application to run onboard of an autonomous helicopter. This common architecture is intended to serve as mechanism to exchange message between processes. The exchange is made through a high level layer which routes the messages to specific processes. The basic functionalities are:

- Define a number of messages to identify the type of information and the destination of these messages. Messages and data structures are defined and then sent to this layer. Different messages for flight control: velocity control, position control, heading, attitude, helicopter state, etc, and for ground processes: type of data sent/received from the ground-based process to/from the onboard vision processes.
- Switch and route the messages depending on the type of information received. For example, the layer can switch between position or velocity control depending on the messages received from an external process.

■ **Visual Servoing of an unmanned helicopter in outdoor environments**

We employ an onboard camera and a visual processor to sent references to the flight control at a given frequency. These vision-based velocity references are translated into helicopter displacements based on the tracked features. The convergence of the references are validated when the UAV is aligned with the target being tracked. There exist two processing loops running at different frequencies in a decoupled fashion. Different experimental work using several platform detailed in Chapter 5, shows the feasibility of the system and validate our proposal.

Dissertation outline

This dissertation is organized as follows:

- Chapter 2 introduces in the state of the art in unmanned aerial vehicles. Both control of UAV and visual control of UAV are introduced. The main research groups doing important development in the field are summarized at the end of the chapter.
- Chapter 3 gives an introduction on the visual control techniques in the literature. The mathematical model of the camera motion and the assumption in which the visual servoing approach is validated is presented. To end the chapter some remarks about the feature detection and tracking techniques used so far are mentioned.
- Chapter 4 discusses the flight control architecture. The control laws that rules the low level control and the integration of the visual information with the flight control is explained as well. Some remarks about the software layer that integrate the control with vision is mentioned. Finally, some results about the controller behavior during autonomous flight are presented.
- Chapter 5 describes several experimental works which exploits some of the techniques proposed in the chapter 3 and 4. These works were performed in different places using different platform, and are the experimental core in which several feature detection and tracking techniques are used in a different fashion to visually control an UAV. Some of this experimental work deal with 2D servoing problem and others with 3D servoing problem.
- In Chapter 6, conclusions are drawn. As well as, the summary of the contributions so far and an outline of the future work to be performed.

ABSTRACT

Índice general

Dedicatoria	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Índice de figuras	XXIII
Índice de cuadros	XXXI
1. Introducción	1
1.1. Desafíos en el control visual de vehículos aéreos autónomos .	2
1.2. Objetivos y propuesta de la tesis	3
1.3. Planteamiento del problema	4
1.4. Contribuciones de la tesis	5
1.5. Estructura de la tesis	6
2. Estado del Arte	9
2.1. Introducción	9
2.2. Control de helicópteros autónomos	10
2.3. Control visual en UAV	13
2.4. Conclusiones	15

3. Seguimiento Visual de Objetivos	19
3.1. Introducción	19
3.2. Control visual de robots	20
3.2.1. Sistemas de control visual, en función de la estructura de control	21
3.2.2. Sistemas de control visual, en función de la informa- ción visual	22
3.3. Sistemas de representación y referencias	24
3.3.1. Sistemas de referencias del vehículo	25
3.3.2. Modelo de la cámara y sistema de referencias cámara- imagen	25
3.4. Seguimiento visual y posicionamiento del vehículo aéreo autóno- mo	28
3.4.1. Sistema de referencias para el control visual de posi- ción vertical y lateral	29
3.4.2. Sistema de referencias para el control visual posición longitudinal y lateral	31
3.5. Modelo dinámico de la cámara	32
3.6. Posicionamiento basado en visión. Definición de la tarea de control visual	37
3.6.1. Control visual lateral	37
3.6.2. Control visual vertical	40
3.6.3. Control visual longitudinal	41
3.7. Seguimiento de características sobre secuencias de imágenes	43
3.7.1. Selección de características	44
3.7.2. Estimación del movimiento en las características . . .	45
3.7.2.1. Métodos determinísticos	45
3.7.2.2. Métodos probabilísticos	46
3.7.3. Métodos de seguimiento – tracking	47
3.7.3.1. Basados en apariencia	48
3.7.3.2. Basados en modelos	49
3.8. Conclusiones	50

4. Diseño del control de vuelo con retroalimentación visual	51
4.1. Introducción	51
4.1.1. Esquema de control	53
4.2. Integración con referencias visuales	56
4.2.1. Capa de interconexión entre procesos	56
4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo	60
4.4. Conclusiones	67
5. Aplicaciones experimentales y resultados	71
5.1. Introducción	71
5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas	72
5.2.1. Detección y seguimiento de líneas eléctricas de alta tensión	73
5.2.2. Descripción general	76
5.2.3. Procesamiento de imágenes: Detección de la catenaria	77
5.2.4. Control servo visual de las cámaras	78
5.2.5. Estimación de las coordenadas 3D	83
5.2.6. Calibración del sistema estereoscópico para el cálculo de las coordenadas 3D	86
5.2.7. Resultados del cálculo de las coordenadas 3D en vuelo real usando un helicóptero a escala	89
5.2.8. Discusión	96
5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos	97
5.3.1. Detección y seguimiento de características para el control de velocidad lateral	97
5.3.1.1. Procesado de imágenes para la detección de características	98
5.3.1.2. Estimación usando Filtro de kalman	102
5.3.1.3. Arquitectura de control del vehículo AVATAR	105
5.3.1.4. Resultados	108
5.3.1.5. Discusión	111

5.3.2.	Detección y seguimiento de características visuales para el control de velocidad lateral y vertical	113
5.3.2.1.	Procesamiento de imágenes	113
5.3.2.2.	Resultados	115
5.3.2.3.	Discusión	120
5.4.	Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos	122
5.4.1.	Simulador hardware experimental: Simulador de vehículo aéreo-SVA	124
5.4.2.	Procesamiento visual	125
5.4.2.1.	Detección de líneas eléctricas para evasión de obstáculos	126
5.4.2.2.	Detección de áreas seguras para el aterrizaje	127
5.4.3.	Estrategia de control visual	129
5.4.4.	Pruebas experimentales: Resultados	132
5.4.5.	Discusión	135
5.5.	Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo	136
5.5.1.	Visión por computador para la navegación	136
5.5.2.	Detección de puntos sobresalientes en la escena	138
5.5.3.	Cómputo de la altura relativa del sistema	139
5.5.4.	Estimación de la velocidad y el desplazamiento del sistema	142
5.5.5.	Validación experimental	146
5.5.5.1.	Pruebas sobre la plataforma terrestre	148
5.5.5.2.	Pruebas sobre la plataforma aérea: un helicóptero autónomo	157
5.5.6.	Discusión	168
5.6.	Conclusiones	168
6.	Conclusiones y futuros desarrollos	171
6.1.	Conclusiones	171
6.2.	Futuros Trabajos	174

Índice general

7. Conclusions and Future Work	177
7.1. Conclusions	178
7.2. Future Work	180
A. Definiciones generales	183
B. Desarrollo matemático del modelo dinámico de la cámara	191
C. Valores de las estructuras de datos usadas para intercambiar mensajes entre procesos	195

Índice de figuras

2.1. Prototipo de helicóptero "Hummingbird" de la Universidad de Stanford. La disposición de las 4 antenas del GPS se aprecia en el fuselaje del helicóptero	11
2.2. Helicóptero prototipo proyecto AVATAR: University of Southern California	12
2.3. Helicóptero de la Universidad Carnegie Mellon: Autonomous Helicopter Project	14
3.1. Control visual mirar y mover dinámico	21
3.2. Control visual mirar y mover estático	21
3.3. Control visual directo	22
3.4. Control visual basado en posición	23
3.5. Control visual basado en imagen	23
3.6. Disposición de los sistemas de referencias	25
3.7. Disposición de los sistemas de referencias de la cámara y la imagen	26
3.8. Sistema sobre el que se definen las referencias visuales de velocidad	30
3.9. Sistema de referencias helicóptero-cámara, control visual de posición vertical y lateral	30
3.10. Sistema de referencias helicóptero-cámara, control visual de posición longitudinal y lateral	32
3.11. Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico	33

3.12. Disposición del helicóptero y la cámara, cámara inferior y cámara frontal. La señal de error se indica en forma vectorial, para expresar que consta de dos componentes de referencia de velocidad en la dirección j e i de la imagen.	38
3.13. Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición lateral	39
3.14. Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición vertical (altitud)	41
3.15. Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición longitudinal	42
4.1. Diagrama general de control. Se muestra la configuración desacoplada del sistema de visión	57
4.2. Esquema de procesos. Procesos externos (nivel superior) interactúan con el control a través de una capa de conexión . . .	58
4.3. Señal de control manual-automático. El valor en alto indica vuelo manual, el valor bajo indica vuelo autónomo	61
4.4. Actitud del helicóptero durante vuelo autónomo. Valores de roll (ϕ), pitch (θ) y yaw (ψ), respectivamente	62
4.5. Evolución en el desplazamiento del helicóptero durante vuelo autónomo	62
4.6. Velocidades del helicóptero durante vuelo autónomo. Velocidad longitudinal (vx), lateral (vy) y vertical (vz), respectivamente	63
4.7. Correspondencia entre los desplazamientos lateral y longitudinal en coordenadas del helicóptero durante vuelo autónomo y los valores de referencia en coordenadas NED (desplazamiento comandados, N (Northing) y E (Easting))	64
4.8. Correspondencia entre el desplazamiento vertical (Z) en coordenadas del helicóptero durante vuelo autónomo y el valor comandado (D) en coordenadas NED	65
4.9. Velocidad longitudinal (vx) y velocidad deseada (vx_d) del helicóptero durante vuelo autónomo.	65

Índice de figuras

4.10. Velocidad lateral (vy) y velocidad lateral deseada (vy_d) del helicóptero durante vuelo autónomo.	66
4.11. Velocidad vertical (vz) y velocidad deseada (vz_d) del helicóptero durante vuelo autónomo.	66
4.12. Correspondencia entre el roll (ϕ) y el roll deseado (ϕ_d) durante vuelo autónomo	67
4.13. Correspondencia entre el pitch (θ) y el pitch deseado (θ_d) durante vuelo autónomo	68
4.14. Correspondencia entre el pitch (ψ) y el yaw deseado (ψ_d) durante vuelo autónomo	68
5.1. Sistema desarrollado durante vuelo. Vista del sistema estereoscópico colocado en la parte frontal y el ordenador de abordo	73
5.2. Disposición de una de las camaras del sistema estereoscópico. Vista del servo acoplado a un lateral de la cámara tipo dedo	74
5.3. Estructura global del sistema. Sistema abordo y en tierra están desacoplados pero comunicados a través de enlaces de comunicaciones	75
5.4. Principio general de funcionamiento del sistema estereoscópico. Se muestran los subsistemas de procesamiento, control y estimación 3D	76
5.5. Subsistema de procesamiento de imágenes. Comprende las operaciones necesarias para la detección de la catenaria . . .	77
5.6. Area local de búsqueda. El área es definida por la intersección de las cuatro líneas definidas por los puntos $(+\Delta\theta, \pm\Delta\rho)$ y $(-\Delta\theta, \pm\Delta\rho)$	79
5.7. Subsistema de control visual. Comprende las operaciones y consignas para mover las cámaras y seguir visualmente la catenaria	79
5.8. Determinación de la ganancia del controlador, consigna vs pixeles. La relación consigna-pixel es la ganancia del controlador.	81

5.9. Respuesta del sistema de control ante tiempos de retraso. La figura (a) muestra la respuesta ante un escalon de 80 pixeles y un tiempo de retraso de 20 milisegundos. La figura (b) muestra la respuesta ante un escalon de 80 pixeles y un tiempo de retraso de 130 milisegundos.	82
5.10. Principio general de funcionamiento del sistema estereoscópico. Se muestran los subsistema de procesamiento, control y estimación 3D	84
5.11. Principio de funcionamiento del sistema estereoscópico. La distancia (d) y la altura (h) del sistema se encuentran al seguir el mismo objetivo visual con ambas cámaras	85
5.12. Escenario de pruebas donde fueron realizados los experimentos. Se muestra la plataforma de vuelo y la línea en segundo plano sobre un fondo.	90
5.13. Señal de error en el plano de la imagen durante la segunda prueba experimental	91
5.14. Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Datos mostrados corresponden al primer vuelo experimental	93
5.15. Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Datos obtenidos durante el segundo vuelo experimental	94
5.16. Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Valores experimentales correspondientes al tercer vuelo experimental	95
5.17. Secuencia de operaciones de preprocesamiento de la imagen	101
5.18. Detección y seguimiento de la ventana. El círculo pequeño corresponde a la característica escogida y el círculo grande a la estimación del filtro de kalman	104
5.19. AVATAR arquitectura de control. Se muestran diferentes módulos encargados de diferentes tareas. Jerarquía descendente donde los módulos de alto nivel estan en la cima de la figura.	106

Índice de figuras

5.20. Señales de error en el plano de la imagen normalizadas entre ± 1 (m/s) y posición de la característica en la imagen a lo largo de la secuencia de seguimiento, en dos vuelos distintos.	109
5.21. a)Señal de error Normalizada (m/s) b)Posición de la característica en la imagen c)Posición del helicóptero en metros (Coordenadas UTM Easting) d)Posición del helicóptero en metros (Coordenadas UTM Northing)	110
5.22. Resultado del algoritmo de seguimiento sobre una secuencia de imágenes durante un vuelo experimental. Puntos en color rojos denotan los objetivos visualmente seguidos.	116
5.23. Sexto vuelo experimental. Las subfiguras a) a e) muestran las señales durante el control visual, subfigura f) muestra el desplazamiento del helicóptero durante la totalidad del vuelo.	117
5.24. Séptimo vuelo experimental. Las subfiguras a) a e) muestran las señales durante el control visual, subfigura f) muestra el desplazamiento del helicóptero durante la totalidad del vuelo.	118
5.25. Area experimental donde se desarrollaron los experimentos. Se muestra un escenario a escala con líneas eléctricas y obstáculos sobre el suelo.	123
5.26. Breve esquema de la disposición del robot y los cables: Simulador de Vehículos Aéreos.	124
5.27. Referencias usadas para el sistema de abordó. Esquema general de la disposición de las cámaras en el efector final. . . .	125
5.28. Vista del simulador sobre las líneas eléctricas. Disposición final de las cámaras para la detección de líneas y zonas de aterrizaje, respectivamente.	126
5.29. Detección de líneas eléctricas desde la perspectiva de la cámara. El centro de gravedad de las líneas se muestra como un círculo blanco. El SVA vuela sobre las líneas y usa la cámara dispuesta con un ángulo de 15°	128
5.30. Secuencia extraída del procesamiento de imágenes a bordo durante una prueba experimental.	130
5.31. Sistema de referencias del simulador, la cámara y la imagen .	131

5.32. Resultados de la segunda prueba experimental. Subfigura a) muestra la posición del SVA en el espacio de trabajo durante esta prueba. Subfigura b) muestra las velocidades del simulador en (m/s)	132
5.33. Resultados de la segunda prueba experimental. Referencias visuales generadas por el algoritmo visual	133
5.34. Resultados de la sexta prueba experimental. Subfigura a) muestra la posición del SVA en el espacio durante esta prueba. Subfigura b) muestra las velocidades del SVA en (m/s) .	133
5.35. Resultados de la sexta prueba experimental. Referencias visuales generadas por el algoritmo de procesamiento visual. .	134
5.36. Máscara de convolución vertical y horizontal	139
5.37. Puntos sobresalientes en la imagen usando el detector de Harris	139
5.38. Principio de disparidad estereoscópica	141
5.39. Gráfica para la calibración ajustando la línea al conjunto de puntos	143
5.40. Valores son hallados con respecto al instante anterior. La matriz de transformación T que considera la rotación y traslación con respecto a la imagen previa.	144
5.41. Dos configuraciones de cámara para validar las dos funcionalidades. a) cámara mira al frente. b) cámara mira hacia abajo	147
5.42. Configuraciones de la cámara sobre el robot terrestre	148
5.43. Configuración de la cámara sobre la plataforma aérea. Cámara colocada al frente de la plataforma	149
5.44. Experimentos sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Figura a) muestra un circuito cerrado y figura b) muestra un circuito abierto	150
5.45. Experimentos sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Figura a) muestra un circuito cerrado y figura b) muestra la evolución de la altura durante las pruebas . . .	150

5.46. Experimentos en interior sobre estimación de la distancia o profundidad del sistema estéreo al plano que contiene las características salientes.	151
5.47. Experimentos en exterior sobre estimación de la distancia o profundidad del sistema estéreo al plano que contiene las características salientes. Estimación a 7m.	152
5.48. Experimentos en exterior sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Estimación para 12m en desplazamiento	152
5.49. Experimentos en exterior sobre estimación de desplazamiento. Medidas referenciales externas GPS.	153
5.50. Experimentos en exterior sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Estimación para 12m en desplazamiento	154
5.51. Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del encoder del robot y las medidas del GPS. . .	155
5.52. Estimación del movimiento y la velocidad del robot hecha por la odometría visual en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.	155
5.53. Desplazamiento en X e Y estimado por la odometría visual en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.	156
5.54. Relación entre la odometría visual y las mediciones del robot en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.	157
5.55. Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, segunda prueba . . .	160
5.56. Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, tercera prueba . . .	161
5.57. Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, séptima prueba . . .	162
5.58. Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, décima prueba . . .	163
5.59. Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, segunda prueba. . . .	164

5.60. Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, tercera prueba.	165
5.61. Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, séptima prueba.	166
5.62. Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, décima prueba.	167
A.1. Ejes de referencia del helicóptero	185
A.2. Ángulo de ataque	185
A.3. Ángulo de cabeceo de las palas del rotor principal	186
A.4. Plato controlador	186
A.5. Paso colectivo	187
A.6. Paso cíclico	188
A.7. Sistema de coordenadas del helicóptero	189
A.8. Sistema de coordenadas NED	189
B.1. Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico. Cámara colocada en la parte frontal del helicóptero y mira al frente	194
B.2. Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico. Cámara colocada sobre el centro de masa del helicóptero y mira hacia abajo	194

Índice de cuadros

2.1. Principales centros	16
4.1. Principales mensajes control	59
4.2. Principales mensajes externos	60
5.1. Valores de ECM (error cuadrático medio) en altura (H) y distancia (D) para diferentes sectores	88
5.2. Principales centros	159

Capítulo 1

Introducción

Los vehículos aéreos autónomos (UAV¹) han sido un área de investigación muy activa durante los últimos años. El uso de UAV en aplicaciones civiles de patrullaje y monitoreo continúa en crecimiento debido en parte por la evolución y reducción en el coste de los sistemas visión. La visión para el control de un UAV implica realizar investigación en diversos campos como la detección y seguimiento de objetos, estimación de posición, fusión sensorial de GPS y medidas inerciales, y modelado y control de sistemas multivariantes no lineales.

Un helicóptero autónomo posee propiedades que lo hacen la plataforma idónea para tareas de inspección y monitoreo. Su inherente habilidad de volar a baja velocidad, estacionariamente, lateralmente y realizar maniobras en espacios reducidos lo hacen la plataforma adecuada para tales tareas. Estas habilidades son particularmente útiles en entornos estructurados donde las características u objetos a seguir visualmente son geométricamente definidos, lo que facilita la estimación y el control basado en visión por com-

¹de sus siglas inglesas Unmanned Aerial Vehicles. Nomenclatura internacional adoptada en el presente trabajo

putador.

La propuesta presentada en esta tesis doctoral combina técnicas de visión por computador con un control de bajo nivel para lograr el control visual de un UAV por medio del seguimiento visual de características en la imagen. El sistema de visión actúa como un controlador de alto nivel enviando consignas de velocidad al control de vuelo, el cual es responsable de un control robusto y estable. El resultado es un algoritmo de seguimiento visual de características que controla los desplazamientos de un helicóptero autónomo en espacios exteriores.

1.1. Desafíos en el control visual de vehículos aéreos autónomos

A pesar de que un helicóptero posee muchas ventajas para determinadas tareas, tiene la desventaja de ser difícil de controlar. Los helicópteros son por naturaleza sistemas multivariable bastante inestables, donde el control de bajo nivel encargado de la estabilidad debe afrontar esta particularidad. Si un helicóptero autónomo deja de percibir comandos de control, aún si es por un corto periodo de tiempo, se volverá inestable y se caerá. Esto hace que el investigar con este tipo de plataformas sea una tarea ardua y desafiante. Al trabajar con estas plataformas existe un pequeño margen para el error, y cuando las cosas van mal los resultados son catastróficos. El problema del control visual aplicado a robots terrestres o robots articulados es un tema que ha sido estudiado ampliamente y donde se han aportado numerosas contribuciones. Sin embargo, para robots aéreos muchos problemas y desafíos quedan aún por resolver. El problema es aún más arduo dado que los robots aéreos operan en un espacio 3D más amplio, que los robots terrestres los cuales operan en 2D, más aún las capacidades y carga útil de los vehículos de pequeña a media escala son muchos más limitadas que la de los robots terrestres.

La visión por computador provee un mecanismo natural de detección y seguimiento de características en UAV, por ser las cámaras livianas y eficientes en consumo de energía. Con el aumento en la miniaturización de los CCD, la visión por computador inclusive ofrece su potencial a los MAUV (Micro Air Unmanned Vehicles). Al contrario de los sensores de escaneo o barrido, como los lasers, las cámaras toman muestras instantáneas del entorno lo que es óptimo para este tipo de plataformas dinámicas. La técnicas de visión por computador en espacios exteriores posee una dificultad extra debido a las condiciones lumínicas. Aún si las condiciones lumínicas son favorables y la escena puede ser capturada con precisión, existe el problema de interpretar la escena y extraer la información relevante de ella. La visión en humanos es considerada eficiente y un mecanismo casi perfecto. Éstos son generalmente capaces de encontrar sentido a la escena e interpretar su contenido, hallando las distancias a los objetos. Para un computador éste no es el caso. Después de más de tres décadas de trabajos en el campo de visión por computador, muchas técnicas han sido desarrolladas las cuales permiten a una máquina sensor el movimiento en una secuencia de imágenes y obtener información 3D del entorno, no obstante, esto puede ser difícilmente comparable con el sistema humano de visión, en términos de precisión y detalle. Además, las cámaras generan datos dispersos y propensos al ruido.

1.2. Objetivos y propuesta de la tesis

En esta tesis doctoral se aborda el problema partiendo de la premisa de un control de vuelo robusto. Al control de vuelo se le introduce la información visual para controlar la trayectoria del helicóptero por medio de la detección y seguimiento de características en el plano de la imagen. Usando técnicas desarrolladas e implementadas las cuales son descritas en capítulos posteriores, un helicóptero autónomo es capaz de:

- Realizar desplazamientos 2D basados en visión, siguiendo las características en el plano de la imagen y usando su ubicación en la imagen

para controlar las maniobras del helicóptero en 2D, es decir, dos de los tres grados de libertad en traslación.

- Usando dos configuraciones de cámaras, el helicóptero puede ser visualmente guiado lateral y verticalmente, y lateral y longitudinalmente.

Se aborda el problema desacoplando el control de bajo nivel del helicóptero del sistema visual. El control de bajo nivel mantiene el helicóptero estable, mientras en un alto nivel, el sistema de visión trata al vehículo como un punto flotante en el espacio, el cual puede ser controlado enviando referencias de velocidad, posición y cambios de orientación.

El sistema de visión propuesto en esta tesis usa diferentes técnicas existentes para detectar puntos salientes en la imagen y seguirlos a lo largo de una secuencia de imágenes. Este trabajo se enfoca en acoplar estas técnicas de una forma novedosa en una plataforma multifuncional. Haciendo énfasis en el hecho de que la tesis ha sido ampliamente validada experimentalmente.

1.3. Planteamiento del problema

El problema del control visual 2D de un helicóptero autónomo puede ser descrito como:

- **Desarrollo del sistema de visión**, éste puede ser subdividido en
 - 1) Diseño del hardware apropiado para acometer la tarea del procesamiento visual a bordo del helicóptero
 - 2) Desarrollo de la arquitectura de software para intercambiar mensajes entre el helicóptero y los procesos externos.
- **Algoritmos de detección y seguimiento de características**, dada una tarea específica. Analizar los diferentes escenarios y tareas, y diseñar o seleccionar la técnica más apropiada para este fin.

- **Integrar la información visual con el control de vuelo**, definir el esquema más adecuado en el cual las referencias visuales son integradas en el control de vuelo.

1.4. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones más significativas la tesis se resumen en:

- **Arquitectura de control de vuelo para su integración con la información visual**

El sistema visual y sus referencias son integradas con el control de vuelo a través de una capa de interconexión usando mensajes TCP/UDP. Esta capa actúa de switch usando un API de comunicaciones. El control de bajo nivel se basa en leyes de control PID y se encarga de la estabilidad del helicóptero. Este controlador ha sido validado empíricamente. El control de alto nivel usa varios modos de funcionamiento como GPS o/y visión para llevar a cabo diferentes tareas como navegación, aterrisaje, seguimiento visual, etc.

- **Arquitectura de software de propósito general para el control visual de un UAV**

Se ha implementado sobre una arquitectura conocida como es la cliente-servidor. Esta arquitectura se basa en mensajes TCP/UDP, lo que permite a las aplicaciones ejecutarse en forma embarcada a bordo del helicóptero. Esta arquitectura común esta dirigida a servir de mecanismo de intercambio de mensajes entre procesos. El intercambio es realizado en alto nivel a través de una capa que enruta los mensajes hacia procesos específicos. Las funcionalidades básicas de esta capa son:

- Definir un número dado de mensajes para identificar el tipo de información y el destino de los mensajes. Mensajes y estructuras de datos son definidos en esta capa, y luego son rellenas

y enviadas por cada uno de los procesos. Diferentes mensajes para el control de vuelo como: modo velocidad, modo posición, orientación, actitud, estado del sistema, etc. Y para procesos externos como: tipo de datos enviados/recibidos por estos procesos hacia/desde los procesos de visión.

- Conmutar y enrutar los mensajes dependiendo del tipo de información recibida. Por ejemplo esta capa puede conmutar entre control de velocidad y/o posición dependiendo del mensaje recibido desde un proceso externo.

- **Control visual de un helicóptero autónomo en espacios exteriores**

Se emplea una cámara a bordo y un sistema de procesamiento visual para procesar la información extraída de la escena y enviar referencias de velocidad al control de vuelo a una frecuencia determinada. Estas referencias de velocidad, basándose en las características objeto de seguimiento, son trasladadas a desplazamientos del helicóptero. La convergencia de estas referencias son validadas cuando el UAV se alinea con el objetivo siendo seguido. Existen dos lazos de procesamiento a diferentes frecuencias en una forma desacoplada. El lazo de control de vuelo interno a una frecuencia dada, y el externo o visual a una frecuencia menor. Diferentes trabajos experimentales usando distintas plataformas se describen en el capítulo 5, los cuales muestran la factibilidad y validan la propuesta presentada.

1.5. Estructura de la tesis

- El capítulo 2 hace una introducción en el estado del arte de vehículos autónomos aéreos. Ambos, el control de vuelo y el control visual en UAV son presentados. Un cuadro resumen con los grupos más relevantes realizando desarrollos en el área se muestra al final del capítulo.

- Una introducción sobre las técnicas de control visual se presentan en el capítulo 3. El modelo matemático para la derivación de las ecuaciones de movimiento de la cámara y las aproximaciones sobre las cuales la propuesta de control visual es validada, se exponen de igual manera. Para finalizar el capítulo se exponen las técnicas más relevantes de seguimiento y detección de características en visión por computador.
- El capítulo 4 expone el control de vuelo y su arquitectura. Las leyes de control que rigen el control de bajo nivel y la integración de la información visual con el control de vuelo se presentan. Comentarios adicionales sobre la capa de interconexión que integra el control con la visión se describe al final de capítulo, así como algunos resultados del comportamiento del control en vuelo autónomo.
- Diferentes trabajos experimentales los cuales aplican las técnicas introducidas en los capítulos 3 y 4 se muestran en el capítulo 5. Estos trabajos fueron llevados a cabo en diferentes lugares geográficos usando distintas plataformas, y constituyen la prueba experimental en la cual diferentes técnicas de detección y seguimiento son usadas para controlar visualmente un UAV de diferentes formas. Algunos de los trabajos presentados en este apartado tratan el problema del control visual 2D y otros abordan el control visual 3D.
- Finalmente en el capítulo 6, se presentan las conclusiones y futuros desarrollos.

Capítulo

Estado del Arte

2.1. Introducción

Los vehículos aéreos autónomos han sido un área de investigación a la que se ha prestado gran interés por muchos años. Actualmente las más prestigiosas universidades y centros de investigación, tanto privados como públicos, se encuentran investigando y desarrollando vehículos aéreos autónomos. Estas plataformas han sido utilizadas para investigar en áreas que van desde el control no lineal, control multivariable, navegación, planificación de trayectorias hasta la detección y seguimiento visual de objetivos.

Dentro la extensa variedad de vehículos aéreos autónomos, cabe destacar por su maniobrabilidad los helicópteros autónomos. Estas plataformas presentan propiedades que las hacen muy adecuadas para tareas de inspección y monitorización. Su inherente habilidad de volar a bajas velocidades, lateralmente o longitudinalmente, realizar vuelos estacionarios y maniobrar en espacios reducidos los hacen vehículos ideales para tales tareas. Misiones típicas requieren que el helicóptero vuele a baja velocidad o se mantenga en vuelo estacionario próximo a un objeto de interés. Esta proximidad en el

vuelo se realiza usando las medidas inerciales y/o las medidas de un GPS, lo que limita el vuelo a un conocimiento previo de la posición global del objeto o a una ruta preprogramada de coordenadas. Un sistema de visión que pueda en tiempo real controlar el helicóptero en una trayectoria arbitraria no está sujeto a estas limitaciones, y por el contrario combinado con otros sensores puede aumentar la precisión en los vuelos próximos a objetos de interés, permitiendo conocer la posición relativa del vehículo con respecto al objeto de interés.

El desarrollo de un helicóptero autónomo guiado por visión requiere investigar en áreas como control, estimación de estado, control visual, y análisis, detección y seguimiento de objetos mediante visión artificial. El siguiente trabajo se enfoca en el control visual, y en el análisis y detección de objetos explorando las posibilidades de usar la visión por computador para controlar la posición de un vehículo aéreo autónomo respecto a un objeto de interés, haciendo uso de trabajos previos en el área de control de helicópteros y estimación de estados. La literatura presentada en este apartado es indicativa en cuanto al control y modelado de helicópteros autónomos, siendo profundizada en cuanto a la detección, seguimiento de características y su aplicación al control visual en UAV. Se presenta un amplio repaso por el estado del arte del control de helicópteros y del uso de la visión en UAV. Para una excelente bibliografía sobre control y modelado de helicópteros se refiere al lector a [Saripalli et al., 2003b], [Shim et al., 1998], [Conway, 1995], [Montgomery, 1999].

A lo largo del siguiente capítulo se revisa en primer lugar la literatura más significativa en cuanto a control de helicópteros autónomos. Seguidamente se presenta el estado actual del control visual en UAV.

2.2. Control de helicópteros autónomos

El estudio de los helicópteros autónomos tiene su origen varias décadas atrás. El modelado dinámico ha sido ampliamente documentado, en par-

ticular en [Prouty, 1990], [Johnson, 1980] donde se presenta un estudio en detalle sobre el modelo aerodinámico y análisis de estabilidad. Dada la inestabilidad propia de los helicópteros los primeros trabajos de investigación se enfocaron en el diseño de controladores estables. En [Yue and Postlethwaite, 1990] se documenta el diseño de un control retroalimentado robusto basado en H_∞ , al igual en [Sugeno et al., 1995] se presenta un control Fuzzy para un Yamaha R-50.



Figura 2.1: Prototipo de helicóptero "Hummingbird" de la Universidad de Stanford. La disposición de las 4 antenas del GPS se aprecia en el fuselaje del helicóptero

Entre los primeros sistemas documentados de navegación para helicópteros autónomos se encuentra [Conway, 1995]. Este sistema (Figura 2.1) presentaba la particularidad de solo usar GPS como sensor principal para la navegación sustituyendo a la Unidad de Medida Inercial (IMU), la cual históricamente se había usado como sensor principal. Este sistema estaba dotado de un GPS que consistía de un oscilador principal y 4 receptores (usando desplazamiento en fase) con 4 antenas colocadas en puntos estratégicos sobre el helicóptero con lo que se conseguía su posición, velocidad, actitud e información angular.

El helicóptero (Figura 2.2) descrito en [Montgomery, 2000] posee una

2.2. Control de helicópteros autónomos

arquitectura jerárquica de módulos de control. Módulos de bajo nivel se encargan de tareas reflexivas y de rápida respuesta como control de bajo nivel, mientras los módulos de alto nivel se encargan de tareas de planificación y navegación. El control se ha diseñado con leyes de control lineal usando controladores PID. Entre los sensores que posee están GPS, IMU, Magnetómetro, Sonar, etc.



Figura 2.2: Helicóptero prototipo proyecto AVATAR: University of Southern California

La Civita [Civita, 2003] presenta un control basado en H_∞ que usa un modelo lineal de alto orden de un Yamaha R-50. El controlador consiste de un lazo interno multivariable para la estabilización de actitud y 4 lazos de control separados para posición y velocidad. En [Shim, 2000] se presenta un sistema de control jerárquico usado en el helicóptero: BErkeley AeRobot project (BEAR) [BEAR, 2006]. La identificación del sistema se usa para generar el modelo del helicóptero, y basándose en este modelo se diseñan las leyes de estabilización. El controlador consta de 3 lazos: 1) un lazo interno de control de actitud, 2) un lazo intermedio de control de velocidad, y 3) un lazo externo de control de posición. Para mejorar el desempeño en la navegación y seguimiento de trayectorias se usa un control NMPTC¹. Adi-

¹siglas inglesas para, nonlinear model predictive trajectory controller

cionalmente en [Kim et al., 2003] se presenta un estudio de varios tipos, técnicas y experimentos sobre control de helicópteros. Las redes neuronales también han servido para diseño e implementación de controladores de vuelo, siendo el Instituto Tecnológico de Georgia [UAVRF, 2006] el que más aportes ha hecho en esta técnica. Entre los trabajos más importantes de este grupo se encuentran [Kim and Calise, 1997], [Kim, 2003], [Lee, 2001] y [Nardi, 2000].

Recientes logros en el control y modelado han permitido extender las capacidades de vuelo, llegando a realizar maniobras acrobáticas. Un ejemplo de este sistema es el helicóptero descrito en [Gavrilets et al., 2002], [Gavrilets, 2003]. Este sistema logra mejor desempeño gracias a la identificación de la dinámica y uso de técnicas de control no lineal. Dos tipos de controladores son usados dependiendo de la fase de vuelo o envolvente de vuelo. Un control velocidad/orientación rate/altitud se usa al inicio y al final de la envolvente de vuelo, mientras que un control de aceleración angular se usa para el vuelo acrobático.

2.3. Control visual en UAV

La visión por computador es uno de los sensores más importantes en robótica. En años anteriores, la complejidad-coste computacional y los altos requerimientos de ancho de banda, habían sido los mayores obstáculos para el control servo visual robusto. Con la introducción de procesadores de alta velocidad, cámaras digitales de bajo coste y tarjetas digitalizadoras más veloces el procesamiento visual en tiempo real, control servo visual y control de servo manipuladores se ha hecho una realidad.

Al hacer referencia al control visual, y en especial al de vehículos autónomos aéreos, se hace referencia al uso de la información visual del procesamiento de imágenes para el control de velocidad, posición absoluta o relativa, o para el control de la orientación de un robot aéreo. Al igual que la literatura sobre control visual contempla el término *camara-en-mano* para

ciertas configuraciones en robots articulados, la misma puede usarse para el caso de robots aéreos [Mahony and Hamel, 2005].

Uno de los primeros helicópteros (figura 2.3) autónomos guiados por visión se describe en [Amidi, 1996]. Este vehículo combina las lecturas GPS con un sistema de visión, con la finalidad aumentar la precisión de la estimación de estado para la navegación. El sistema de visión consiste de un procesador DSP que proporciona medidas de posición, velocidad y actitud a frecuencias del orden de 10ms, que combinado con las lecturas del GPS y IMU aumenta la precisión en la estimación de la actitud y la posición del helicóptero.



Figura 2.3: Helicóptero de la Universidad Carnegie Mellon: Autonomous Helicopter Project

En [Bosse, 1997] se enfoca el uso de una cámara como sensor adicional para la navegación de un helicóptero autónomo. Dada una secuencia de imágenes tomadas por una cámara se consigue la estimación de movimiento 3D de la cámara. Esta estimación se fusiona con la información inercial y se aplica al caso del aterrizaje del helicóptero. El control visual también se ha aplicado a vehículos en miniatura, en el caso de un helicóptero (HMX-4) de cuatro rotores [Altuğ, 2003], [Altuğ et al., 2005] donde la visión se usa

para determinar la disposición del helicóptero y para la detección de objetos en tierra. En el caso de aviones en miniatura [Causey, 2003] la detección y localización del horizonte se usa para el control lateral de un mini UAV. Zhang [Zhang, 2000] usó una cámara a bordo para detectar y seguir un círculo coloreado con la finalidad de controlar un dirigible. La planificación de la trayectoria se realiza en el plano de la imagen, con lo que se elimina la calibración y se ahorra costo computacional. Sin embargo el control visual se realiza introduciendo la dinámica del sistema (dirigible) en el procesamiento visual.

En el área del aterrizaje autónomo basado en visión, recientemente en [Merz et al., 2004] la detección de un patrón conocido usando visión por computador y la fusión de esta información con las medidas inerciales permite aterrizar este helicóptero en caso de no disponibilidad de GPS. En [Johnson et al., 2005] técnicas de visión por computador son usadas para recobrar y detectar aquellas áreas seguras para aterrizaje en terrenos desconocidos. Anteriormente, la visión artificial se usó para aterrizar autónomamente un helicóptero usando dos estrategias diferentes [Saripalli et al., 2003a] y [Shakernia et al., 1999], pero con la particularidad de ser la visión por computador la fuente principal de información.

En el caso de la navegación 3D basada en visión Habrar [Hrabar, 2006] propone una técnica de evasión de obstáculos basada en visión por computador combinando flujo óptico y visión estereoscópica. Experimentos demuestran las ventajas de combinar ambas técnicas, las cuales a su vez combinadas con un planificador de trayectorias basado en mapas probabilísticos permite la navegación de un helicóptero autónomo en entornos urbanos.

2.4. Conclusiones

Este capítulo ha presentado una vista general sobre los grupos y desarrollos actuales en cuanto a vehículos aéreos autónomos, con especial énfasis en los helicópteros autónomos. El rápido desarrollo de esta tecnología esta

logrando que el estado de la técnica avance de manera vertiginosa encontrándonos nuevos desarrollos y aplicaciones cada día, algunas por su carácter privado no son documentados publicamente. Si bien el tema del control de helicópteros ha sido bien estudiado y esta siendo considerado solucionado, no lo es así el uso de la visión por computador para el control visual. Los altos requerimientos de confiabilidad y robustez que exige el control de UAV, exige a su vez nuevos desarrollos y técnicas de visión por computador que satisfagan dichos requerimientos.

Una de las propuestas de la presente tesis es el lograr esta robustez a través del desacoplo del control de vuelo de bajo nivel del procesamiento visual. Adicionalmente, el desarrollo y uso de algoritmos de procesamiento visual más fiables y robustos, permite que el control visual se lleve a cabo sin la necesidad de fusión con la información inercial. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos expuestos, bien sea, visión monocular o estéreo, la estimación de estado ha sido realizada fusionando la información visual con las medidas inerciales, GPS o Giroscopos, con la intención de lograr un grado más de robustez.

Finalmente con el propósito de introducir al lector de manera breve en los proyectos más relevantes, la siguiente tabla muestra un repaso por los principales grupos y plataformas de helicópteros autónomos en uso hoy en día.

Cuadro 2.1: Principales centros de investigación y helicópteros autónomos de desarrollo

Centro	Principales características
Georgia Institute of Technology	<ul style="list-style-type: none">• Helicóptero Yamaha R-50• ISIS IMU con frecuencia de actualización a 100Hz. Desviación 0.02 grados/minuto
Continúa próxima página	

Cuadro 2.1– continúa de la pagina anterior

Centro	Principales caracterísiticas
	<ul style="list-style-type: none"> • Altímetros basados en radar y sonar • Control basado en redes neuronales. Feedback Linearization
Caneegie Mellon University	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Yamaha R-Max • Litton LN-200 IMU a 400Hz freq. de actualización • Novatel RT-2 GPS diferencial • Control H_∞
University of Southern California	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Bergen Industrial Twin • ISIS IMU a 100Hz freq. de actualización • Novatel RT-2 GPS diferencial • Control PID
Linkoping University	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Yamaha R-Max • RTK GPS, sonar, compass, sensor de temperatura y presión • Yamaha sensores de actitud (YACS) • Control Fuzzy. Basado en modelado de dinámico
Massachusetts Institute Technology	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero X-Cell 60 • ISIS IMU a 100Hz freq. de actualización • Honeywell HPB200A altímetro, Superstar GPS a 1Hz • Control basado en LQR
University of California Berkeley	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Yamaha R-Max • Sistema integrado Boeing DQI-NP INS/GPS. Provee información de velocidad, posición y actitud • Novatel RT-2 GPS diferencial
Continúa próxima página	

Cuadro 2.1– continúa de la pagina anterior

Centro	Principales caracterísiticas
	<ul style="list-style-type: none"> • Control H_∞
Swiss Federal Institute of Technology	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero de Huner Technik, Suiza • Novatel RT-2 GPS diferencial • IMU a 200Hz de frec. de actualización • Control H_∞
TU Berlin	<ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Petrol Trainer 180 de SSM, Alemania • RT-2 Novatel GPS diferencial • IMU a 100Hz de frec. de actualización • Control PID
Universidad Politécnica de Madrid	<p>Grupo de Visión por Computador</p> <ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Bergen Industrial Twin • Ordenador mini-ITX abordo para procesamiento visual • Cámaras Firewire a color • Royaltek REB2100 GPS • IMU a 200Hz de frec. de actualización • Control PID <p>Grupo de Robótica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Helicóptero Benzin Trainner • RT-2 Novatel GPS diferencial • IMU, PC104 a bordo para el control • Control PID. Adaptativo

Capítulo 3

Seguimiento Visual de Objetivos

3.1. Introducción

La visión por computador es una fuente rica en información, que no sólo puede ser usada para la detección y seguimiento de objetos, sino que adicionalmente puede generar información que puede ser empleada para realizar el posicionamiento de un robot relativo a un objetivo, lo que suele denominarse control servo visual [Hutchinson et al., 1996].

En la literatura se hace referencia a las características visuales, como cualquier conjunto de puntos o estructuras que puedan ser extraídas de la imagen. Éstas por lo general corresponden a proyecciones físicas de objetos sobre el plano de la imagen. Con esta información en el plano de la imagen, la tarea de control suele ser aquella tal que minimiza el error, por lo general la posición u orientación de esta característica en la imagen, llevando al robot a una posición deseada. En el presente capítulo se describen sistemas

de referencias usados en los diferentes trabajos experimentales, el tipo de información espacial que puede ser usada a partir del análisis de la imagen y su aplicación a las diferentes tareas de control visual. Adicionalmente, se hace mención sobre el seguimiento visual de características a lo largo de secuencias de imágenes.

Este capítulo sirve de introducción al capítulo 5 donde se abordan varios trabajos en los cuales se han usado las técnicas a continuación mencionadas, con aplicaciones potenciales reales.

3.2. Control visual de robots

Existen numerosas técnicas y clasificaciones recogidas en la bibliografía con las cuales se puede realizar el control servo visual. Un sistema de control visual en función de la información obtenida de la imagen, puede estar basado en posición o imagen, 3D o 2D, respectivamente. Sin embargo, si la estructura de control visual genera referencias al controlador interno del robot o actúa directamente sobre los actuadores, puede decirse es un control visual indirecto o control visual directo, respectivamente. A continuación se describen las formas de control visual más relevantes.

En los años 80 se introdujo por primera vez la primera taxonomía sobre los sistemas de control visual [Sanderson and Weiss, 1983], a partir de allí se han hecho las siguientes dos grandes clasificaciones, en función de la estructura de control y en función de la información visual extraída de la imagen, habiendo subclases dentro de estos dos grupos. Adicionalmente, en función de la configuración física del sistema se suele distinguir si la cámara esta montada sobre el efector final, en ese caso se denomina cámara en mano (*eye-in-hand*) o si la cámara esta fija en la escena, lo que se denomina cámara estática (*eye-to-hand*).

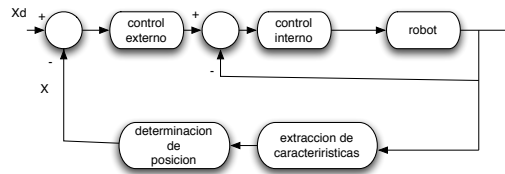


Figura 3.1: Control visual mirar y mover dinámico

3.2.1. Sistemas de control visual, en función de la estructura de control

Control visual indirecto: Si el sistema de control tiene la estructura de dos etapas, es decir, el sistema posee un bucle interno rápido o controlador interno del robot, y otro externo visual y más lento que genera las referencias en todo momento a ese controlador interno.

Adicionalmente, se hace una distinción en el caso en que los bucles operan en forma secuencial, en este caso se denomina *estático* (figura 3.2), o si la información esta presente en todo momento, aún cuando el robot esta en movimiento, en este caso se denomina *dinámico* (figura 3.1). Comúnmente se suele llamar a este tipo de control *mirar y mover estático* y *mirar y mover dinámico*, respectivamente.

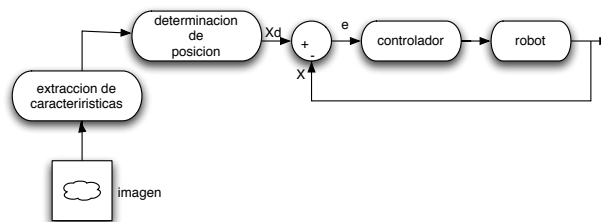


Figura 3.2: Control visual mirar y mover estático

Control visual directo: En este tipo de control las consignas de error provenientes del análisis visual de las imágenes se introducen directamente como consignas de control a los actuadores del robot, como puede verse en la figura 3.3, el bucle de control interno no se usa. A este control comúnmente se suele llamar *control servo visual*.

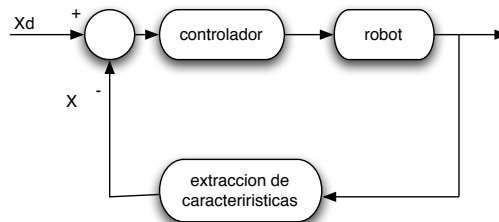


Figura 3.3: Control visual directo

3.2.2. Sistemas de control visual, en función de la información visual

Control visual basado en posición: Este tipo de control se basa en la información tridimensional de la escena que el análisis de las imágenes proporciona. Por lo general se requiere un modelo geométrico del objetivo, en conjunción con un modelo calibrado de la cámara, con lo que se estima la posición y orientación del objetivo. La tarea de control que minimiza el error, se realiza en el espacio de trabajo del robot. Figura 3.4.

Control visual basado en imagen: En este control la señal de error que se genera en la imagen se usa directamente como señal de control. Típicamente la tarea de control trata de reducir una medida de distancia entre la posición actual y deseada del objetivo en la imagen. Figura 3.5

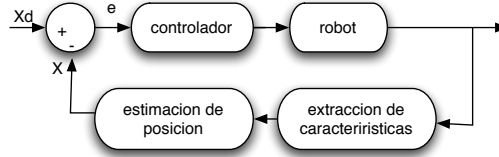


Figura 3.4: Control visual basado en posición

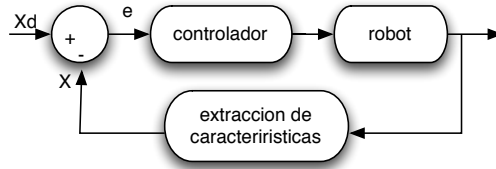


Figura 3.5: Control visual basado en imagen

Existe una combinación de los esquemas anteriores que se denomina $2\frac{1}{2}$ D donde la tarea de control se realiza en el plano de la imagen y en el espacio de trabajo del robot, simultáneamente.

La realización de tareas robóticas con un helicóptero requiere de estructuras de control en tiempo real. En ocasiones la dinámica altamente no lineal y acoplada del helicóptero impide que pueda ser incluida en las leyes de control visual. Al ser el helicóptero considerado como un robot con un bucle interno (rápido) al cual se le introducen referencias desde un lazo externo generalmente a una frecuencia mas baja, deja ver la existencia de dos bucles de control a diferentes frecuencias. El bucle externo genera referencias en todo momento al bucle interno. Encontramos por consiguiente su similitud con el control *mirar y mover dinámico*.

Con respecto a la posición de la cámara, la presente propuesta se basa en colocar una cámara a bordo del helicóptero, realizando el procesamiento de

la información visual a bordo del mismo. Por lo que puede considerarse que la cámara esta colocada en el efector final, configuración cámara en mano (eye-in-hand). Anteriormente, se mencionó que el control visual basado en posición requiere a priori del conocimiento de ciertos parámetros del objeto (modelo 3D), así como de parámetros intrínsecos de la cámara, lo que presenta ciertos desafíos a la hora de ser utilizados para el control visual de un helicóptero autónomo, a continuación se mencionan algunos de los desafíos que presenta el control en posición:

- Necesidad de la reconstrucción 3D del objeto.
- Conocimiento del modelo del objeto.
- Dependencia de la calibración de la(s) camara(s).
- Alto coste computacional.
- La tarea de control se define en el espacio cartesiano.

Por tanto la opción de un control basado en imagen se presenta como alternativa, la cual a su vez puede decirse constituye una de las aportaciones de la presente tesis, la cual es la definición de una estrategia y un marco de control visual 2D para un helicóptero autónomo. La estrategia seguida en la presente tesis doctoral puede decirse se enmarca dentro del control visual mirar y mover dinámico basado en imagen.

3.3. Sistemas de representación y referencias

Antes de definir el espacio de trabajo de la tarea de control, se muestran en primer lugar los diferentes sistemas de referencias y coordenadas que se usan para la representación de las señales involucradas en el sistema.

3.3.1. Sistemas de referencias del vehículo

La descripción cinemática del vehículo parte de la existencia de dos sistemas de referencias, uno el del mundo o NED (Apéndice A) y otro el del helicóptero¹ xyz . El sistema NED se asume local y plano, y cuyo origen esta en la posición inicial del helicóptero o su centro de gravedad. El sistema de coordenadas del helicóptero tiene su origen en el centro de masa del helicóptero, y siempre alinea el eje x con el eje longitudinal del helicóptero, el eje z en dirección hacia abajo y el eje y que es ortogonal a los anteriores siempre apunta hacia la derecha, si se mira desde atrás, como muestra la figura 3.6

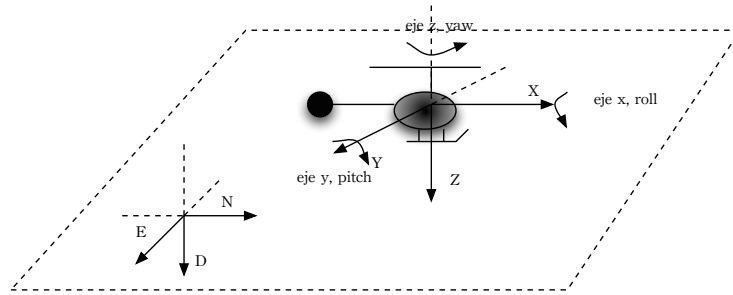


Figura 3.6: Disposición de los sistemas de referencias

3.3.2. Modelo de la cámara y sistema de referencias cámara-imagen

El modelo geométrico de proyección usado ha sido el denominado modelo de proyección perspectiva o modelo "pinhole". Este modelo (ilustrado en la figura 3.7) lo componen el plano π llamado plano de la imagen, el centro óptico O.

La distancia entre el centro óptico y el plano de la imagen se denomina distancia focal f . El plano de la imagen contiene la proyección 2D del

¹generalmente en la literatura de helicópteros a este sistema se le denomina *bodyframe*

3.3. Sistemas de representación y referencias

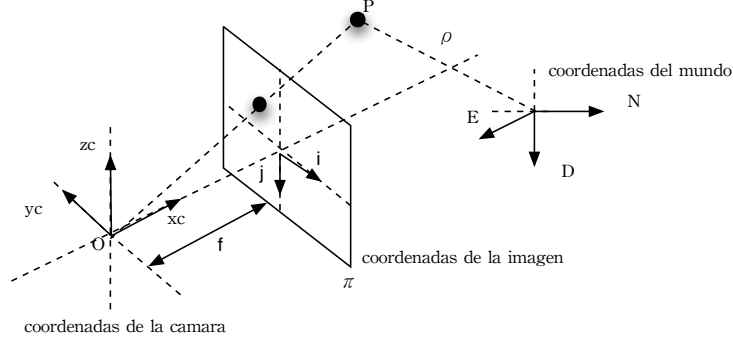


Figura 3.7: Disposición de los sistemas de referencias de la cámara y la imagen

entorno. Cualquier punto en el espacio 3D es proyectado a la imagen en coordenadas $[i, j]^T$, este punto se encuentra al intersectar la línea que une el punto en el espacio con el centro óptico, sobre el plano π . Este punto en el espacio con coordenadas del mundo $P_{ned} = [n, e, d]^T$ en \mathbb{R}^w se puede transformar a coordenadas de la cámara $P_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ en \mathbb{R}^c usando la ecuación 3.1. Estos dos sistemas se pueden relacionar a través de una matriz de rotación R 3×3 y un vector de traslación T 3×1 , ecuación 3.1. Es importante tener en cuenta que en el sistema de representación NED se considera la altitud sobre el suelo con valores negativos decrecientes o crecientes en módulo. Por lo que el vector de traslación T debe considerar un cambio de signo en la componente vertical ($D \rightarrow z_c$) cuando se transforma de P_{ned} a P_c . La matrices R y T expresan magnitudes de la cámara con respecto al mundo.

$$P_c = R * P_{ned} + T \quad (3.1)$$

La matriz R de rotación se expresa por lo general usando los ángulos de Euler, como combinación de la rotación sobre los tres ejes, expresadas por ϕ, θ, ψ , ecuación 3.2

$$R = R(\phi) * R(\theta) * R(\psi) \quad (3.2)$$

Donde las matrices de rotación individuales vienen dadas por:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}(\phi) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}(\psi) &= \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Al realizar la multiplicación la matriz resultante es:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\psi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix}$$

Sobre el plano de la imagen se suele definir su sistema de referencias, cuyo origen se encuentra situado en el vértice superior izquierdo. Sobre este sistema se definen las coordenadas de la imagen en píxeles (i,j) . La transformación sistema cámara-imagen se suele llevar a cabo por medio de los parámetros intrínsecos (κ) de la cámara, estos son la distancia focal f , el centro de la imagen (C_i, C_j) , la distorsión óptica o "skew" S definida como el ángulo entre píxeles (i, j) y la relación pixel-mm en la dirección horizontal y vertical, α_i y α_j , respectivamente.

Sea el punto P^c en \mathfrak{R}^c en la escena con coordenadas (x_c, y_c, z_c) y el punto P^{im} en \mathfrak{R}^{im} que denota su proyección en la imagen con coordenadas (i, j) . La transformación $\mathfrak{R}^c \rightarrow \mathfrak{R}^{im}$ entre estos sistemas viene dada por:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \kappa \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Considerando los parámetros intrínsecos anteriormente mencionados se tiene:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_i & \alpha_i & S \\ C_j & 0 & \alpha_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

El planteamiento utilizado en esta tesis doctoral es el de considerar el modelo de proyección perspectiva asumiendo un modelo de cámara *pinhole* [Forsyth and Ponce, 2002] (refierase a la figura 3.11). Por lo que las ecuaciones anteriores se simplifican teniendo:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \frac{f}{x_c} \begin{pmatrix} y_c \\ z_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_i \\ C_j \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

3.4. Seguimiento visual y posicionamiento del vehículo aéreo autónomo

Tal como se ha descrito en secciones anteriores, el posicionamiento de un vehículo puede realizarse con la información visual. Dicho posicionamiento puede ser global o relativo, en función de la tarea a realizar. El posicionamiento global se suele emplear cuando se recorren grandes distancias e implica que el helicóptero debe llegar a una coordenada global dada. Mientras, que el posicionamiento relativo es necesario cuando se requiere vuelos precisos relativos a un objeto de interés.

Basándose en las definiciones dadas en la sección anterior, nuestra tarea de control se realiza en plano de la imagen o 2D, lo que conlleva a que el control visual corrige la posición relativa del vehículo en dos, de los tres ejes

en el espacio o definido de otra manera, controla dos grados de libertad de los tres en traslación. Existen dos casos en los cuales el procesamiento visual puede ser utilizado para el control servo-visual del vehículo.

- Control del desplazamiento vertical y lateral del vehículo. En esta configuración la cámara se posiciona en la parte frontal del vehículo, apunando hacia delante. Lo que permite a través de la imagen generar referencias de velocidad para controlar la altitud y la posición lateral del vehículo.
- Control del desplazamiento longitudinal y lateral del vehículo. En esta configuración la cámara se posiciona en la parte inferior, apunando hacia abajo. Lo que permite generar referencias de velocidad para controlar la posición lateral y longitudinal

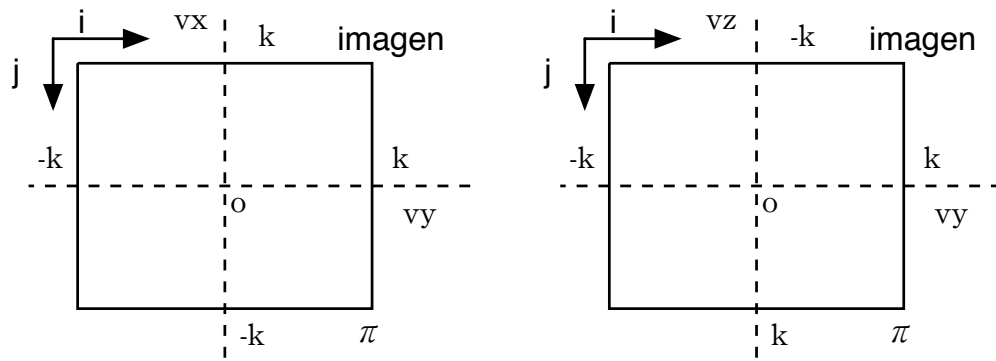
Dependiendo del caso, sobre el plano de la imagen se define el sistema de referencias de velocidades, es decir, el sistema sobre el cual se miden la referencias visuales de velocidad longitudinal, vertical y lateral enviadas al control de vuelo. Éste tiene su origen en el centro de la imagen y varía de $-kV_r$ a kV_r en ambos ejes, como se ilustra a continuación en la figura 3.8.

3.4.1. Sistema de referencias para el control visual de posición vertical y lateral

A continuación se muestra la disposición de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del helicóptero. Dada la relación cinemática fija entre la cámara y el sistema de coordenadas del helicóptero, es posible, referenciandonos en el esquema mostrado en la figura 3.8(b), generar referencias de velocidad vertical y lateral, lo que traducido al espacio 3D la señal de error que controla directamente la altitud y la posición lateral del vehículo, mientras se mantiene fija la distancia o profundidad con respecto al objetivo.

La figura 3.9, muestra la disposición del espacio de trabajo donde se realiza la tarea de control. Como se mencionó anteriormente, la ley de control

3.4. Seguimiento visual y posicionamiento del vehículo aéreo autónomo



a) control visual longitudinal y lateral b) control visual vertical y lateral

Figura 3.8: Sistema sobre el que se definen las referencias visuales de velocidad

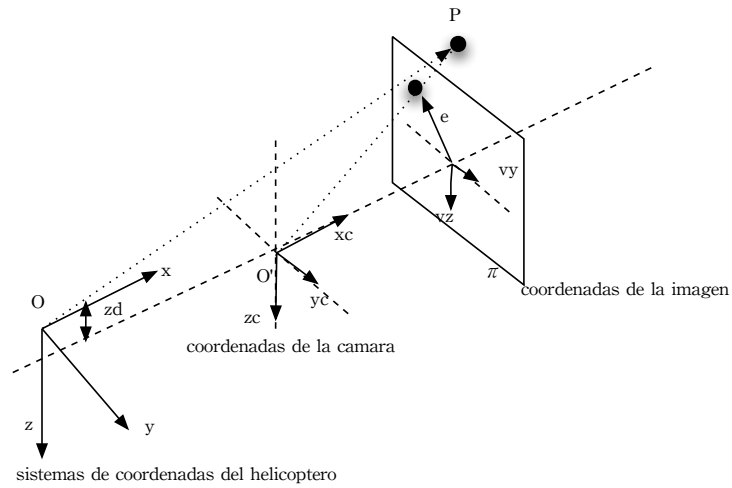


Figura 3.9: Sistema de referencias helicóptero-cámara, control visual de posición vertical y lateral

en el plano de la imagen alinea el vehículo con el objetivo moviendolo en plano y - z . Como puede observarse en la figura las coordenadas en z coinciden con el sistema de referencias (cámara), y a su vez se definen en la imagen [figura 3.8(b)] las coordenadas de velocidad, al no hacerse ninguna conversión intermedia, dichas referencias en el plano de la imagen pueden alinear el helicóptero con el punto en el espacio.

3.4.2. Sistema de referencias para el control visual posición longitudinal y lateral

La figura 3.10 muestra la disposición de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del helicóptero en el caso de que la posición longitudinal y lateral sea controlada visualmente, además se muestra la disposición del espacio de trabajo donde se realiza la tarea de control. Análogamente al caso anterior si nos referenciamos a la figura 3.8(a) se pueden generar referencias de velocidad longitudinal y lateral, lo que traducido al espacio 3D la señal de error que controla directamente la posición lateral y longitudinal del vehículo, mientras se mantiene fija la altitud con respecto al objetivo.

Como se mencionó, la ley de control en el plano de la imagen alinea el vehículo con el objetivo moviendolo en plano $x - y$ o $y_c - z_c$. Como puede observarse en la figura el eje x coincide teóricamente con el eje z_c sistema de referencias (cámara), y como se ha definido en la imagen referencias que coinciden con el sistema del helicóptero [figura 3.8(a)], dichas referencias en el plano de la imagen pueden alinear el helicóptero con el punto en el espacio. En la práctica la cámara se dispone de tal manera que estos ejes x y z_c coincidan cumpliendo con esta definición.

Es importante hacer notar que la ubicación de la cámara en ambos casos es fija en relación con el sistema de coordenadas del helicóptero. La disposición en cada caso conlleva a que la relación cinemática sea fija, por lo que cualquier magnitud asociada con los ejes del helicóptero puede ser aproxima-

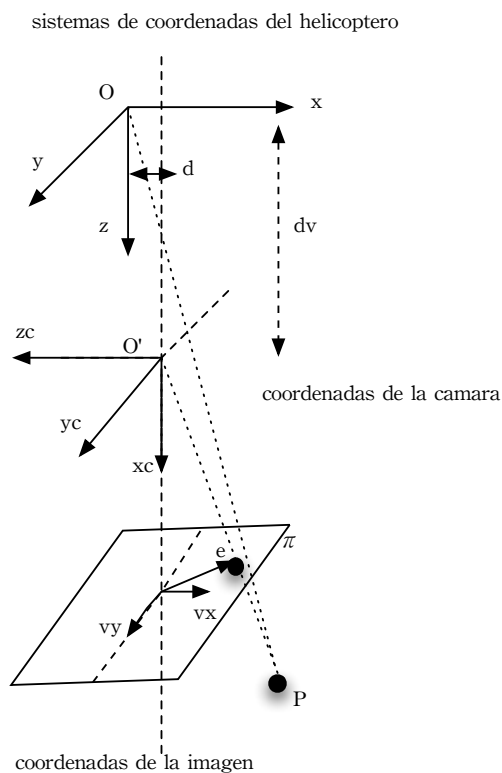


Figura 3.10: Sistema de referencias helicóptero-cámara, control visual de posición longitudinal y lateral

da al sistema de coordenadas de la cámara, y viceversa. Esto es, se puede asumir que la velocidad de la cámara es la misma que la del helicóptero, así como los ángulos de actitud

3.5. Modelo dinámico de la cámara

La sección anterior presentó las ideas generales sobre los sistemas de referencias imagen-cámara-helicóptero, así como una introducción sobre la

propuesta de control visual. A continuación se presenta el modelo matemático y desarrollo de las ecuaciones que rigen la dinámica de la cámara y las condiciones bajo las cuales se basa la propuesta de esta tesis doctoral. El razonamiento a desarrollar a continuación se centra en la cámara y su sistema de referencias, como se mencionó anteriormente bajo ciertas condiciones se puede aproximar estas magnitudes a las del helicóptero.

Basándose en la configuración mostrada en la figura 3.11, la cámara con su sistema de coordenadas C , la imagen cuyo sistema de coordenadas tiene su origen en la esquina superior izquierda y el punto $P(x, y, z)$ en coordenadas de la cámara, se denotará en adelante por $P^c(x^c, y^c, z^c)$, cuya proyección en el plano de la imagen es (i, j) (ecuación 3.5). Se asume que la cámara se mueve con velocidad $V = (v_x^c, v_y^c, v_z^c)$ y velocidad angular $\omega = (w_x, w_y, w_z)$.

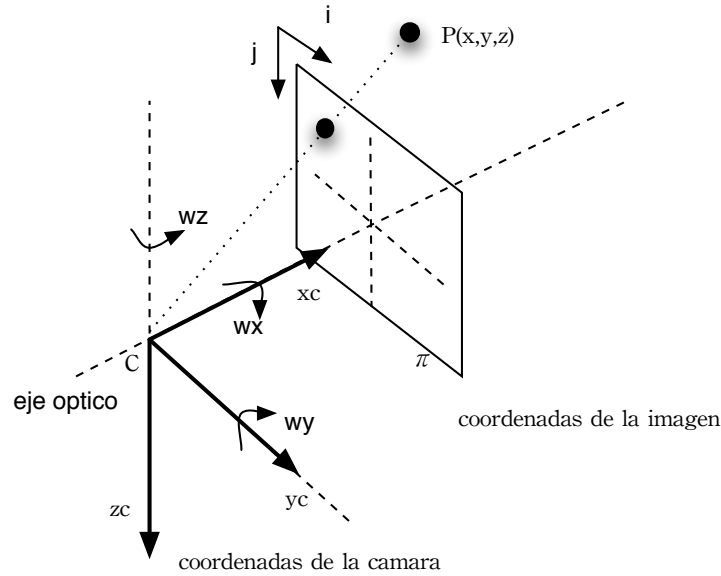


Figura 3.11: Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico

3.5. Modelo dinámico de la cámara

Considerando lo anterior, la velocidad del punto P^c puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\dot{P}^c = -(V + \omega \times P^c) \quad (3.6)$$

El signo menos indica que la cámara esta en movimiento y el punto estático. Desarrollando la ecuación 3.6 se tiene:

$$\dot{x}_c = -(v_x^c + \omega_z y_c - \omega_y z_c) \quad (3.7)$$

$$\dot{y}_c = -(v_y^c + \omega_z x_c - \omega_x z_c) \quad (3.8)$$

$$\dot{z}_c = -(v_z^c + \omega_x y_c - \omega_y x_c) \quad (3.9)$$

Dado que la configuración de la cámara para el modelo matemático tiene similitud con la configuración mostrada en la figura 3.9, las aproximaciones definidas a continuación tienen su aplicación a el caso del control visual de posición vertical y lateral.

aproximación 3.1: La velocidad angular o la rotación de la cámara sobre su eje óptico es despreciable. En la practica las magnitudes asociadas con este eje se mantienen constantes y/o mínimas, lo que permite hacer la primera aproximación llevando $w_x = 0$. Esto permite expresar la ecuaciones 3.8 y 3.9 como:

$$\dot{y}_c = -v_y^c - \omega_z x_c \quad (3.10)$$

$$\dot{z}_c = -v_z^c + \omega_y x_c \quad (3.11)$$

Por otro lado derivando las ecuaciones 3.5 la velocidad en el plano de la imagen del punto P puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\dot{i} = \frac{f}{x_c^2} (x_c \dot{y}_c - \dot{x}_c y_c) \quad (3.12)$$

$$\dot{j} = \frac{f}{x_c^2}(x_c \dot{z}_c - \dot{x}_c z_c) \quad (3.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.7, 3.10 y 3.11 en las ecuaciones 3.12 y 3.13, se tiene:

$$\dot{i} = \frac{f}{x_c^2}[x_c(-v_y^c - \omega_z x_c) - y_c(-v_x^c - \omega_z y_c + \omega_y z_c)] \quad (3.14)$$

$$\dot{j} = \frac{f}{x_c^2}[x_c(-v_z^c + \omega_y x_c) - z_c(-v_x^c - \omega_z y_c + \omega_y z_c)] \quad (3.15)$$

Haciendo operaciones y re-ubicando algunos términos se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\dot{i} = -\frac{f}{x_c}[v_y^c + \omega_z x_c - \omega_x \frac{x_c}{f}(j - C_j)] + \frac{(i - C_i)}{x_c}[v_x^c + \frac{x_c}{f}(\omega_z(i - C_i) - \omega_y(j - C_j))] \quad (3.16)$$

$$\dot{j} = -\frac{f}{x_c}[v_z^c + \omega_x \frac{x_c}{f}(i - C_i) - \omega_y x_c] + \frac{(j - C_j)}{x_c}[v_x^c + \frac{x_c}{f}(\omega_z(i - C_i) - \omega_y(j - C_j))] \quad (3.17)$$

Expresando las ecuaciones anteriores de otra forma tenemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i-C_i}{x_c} & -\frac{f}{x_c} & 0 & j-C_j & \frac{(i-C_i)(j-C_j)}{f} & \frac{(i-C_i)^2}{f} - f \\ \frac{j-C_j}{x_c} & 0 & -\frac{f}{x_c} & -(i-C_i) & f - \frac{(j-C_j)^2}{f} & \frac{(i-C_i)(j-C_j)}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^c \\ v_y^c \\ v_z^c \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Finalmente se tienen las ecuaciones que relacionan el movimiento de la cámara con la velocidad y posición de la característica en la imagen. A continuación se definen aproximaciones adicionales que completan el modelo.

aproximación 3.2: El movimiento de la cámara se asume en cada caso en dos de los tres ejes de movimiento, manteniendo constante el movimiento a lo largo del tercer eje. Por ejemplo, si la cámara se mueve verticalmente y lateralmente, en $y^c - z^c$, se lleva a cero el desplazamiento en x^c , esto permite aproximar $v_x^c = \dot{x}_c = 0$ y $x_c = k = \text{constante}$.

aproximación 3.3: Si en cada caso este desplazamiento se realiza a baja velocidad manteniendo los ángulos de actitud constantes o mínimos, permite aproximar $w_z = 0$ y $w_y = 0$. Un movimiento de traslación puro en dos ejes.

Aplicando estas restricciones las ecuaciones resultantes son:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{j} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{f}{x_c} & 0 \\ 0 & \frac{f}{x_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y^c \\ v_z^c \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Expandiendo los términos:

$$\dot{i} = -K v_y^c \quad (3.20)$$

$$\dot{j} = -K v_z^c \quad (3.21)$$

con $K = \frac{f}{x_c}$

Lo que relaciona directamente la velocidad de las características en la imagen con la velocidad de la cámara. Del razonamiento anterior se concluye que si una característica en la imagen se mueve con velocidad negativa, la cámara se moverá con velocidad positiva, y viceversa. Dado esto, la posición y/o velocidad de una característica en la imagen puede ser usada para generar referencias y mover la cámara (o helicóptero) hasta un punto deseado. El desarrollo hecho anteriormente tiene su aplicación directa en el caso en que la cámara se ubica en la parte frontal del vehículo (hacia el frente) y se quiera controlar la altitud y el desplazamiento lateral del helicóptero usando la posición de la característica en la imagen.

Un razonamiento análogo se hace en el apéndice B para el caso en que la cámara se rota 90 grados con respecto al helicóptero (cámara hacia abajo), y se realiza control del desplazamiento longitudinal y lateral. Las aproximaciones hechas anteriormente también serán válidas para este desarrollo.

Sobre el razonamiento anterior se basa la definición de la tarea de control visual dada en la sección siguiente.

3.6. Posicionamiento basado en visión. Definición de la tarea de control visual

La tarea del control visual, como se ha mencionado anteriormente, se encarga de alinear el vehículo con respecto a un objetivo basándose solo en la información visual 2D que extrae de la escena. A continuación se define como se generan las señales de referencias de velocidad que son enviadas al control de vuelo para realizar el control visual. Según el esquema de control mostrado en el capítulo 4 se definen principalmente tres maniobras que son controladas visualmente, el control de posición lateral, vertical y longitudinal. La figura 3.12 muestra la disposición de la cámara durante el control visual de las maniobras. Cabe destacar que el control visual lateral del vehículo puede ser llevado a cabo utilizando ambas configuraciones.

3.6.1. Control visual lateral

Para el control de la velocidad lateral, y por consiguiente, de la posición lateral del helicóptero se puede usar una cámara colocada en la parte frontal del vehículo o en la parte inferior del mismo. En el caso ilustrado en la figura 3.13(a) la cámara está situada en la parte inferior. La tarea de control visual se define como aquella donde los ángulos α y β se conducen a cero. Pero debido a que en el cálculo de dichos ángulos son introducidos muchos parámetros de incertidumbre, derivados de la calibración y condicionados por la elección de un modelo de cámara más complejo, se escoge

3.6. Posicionamiento basado en visión. Definición de la tarea de control visual

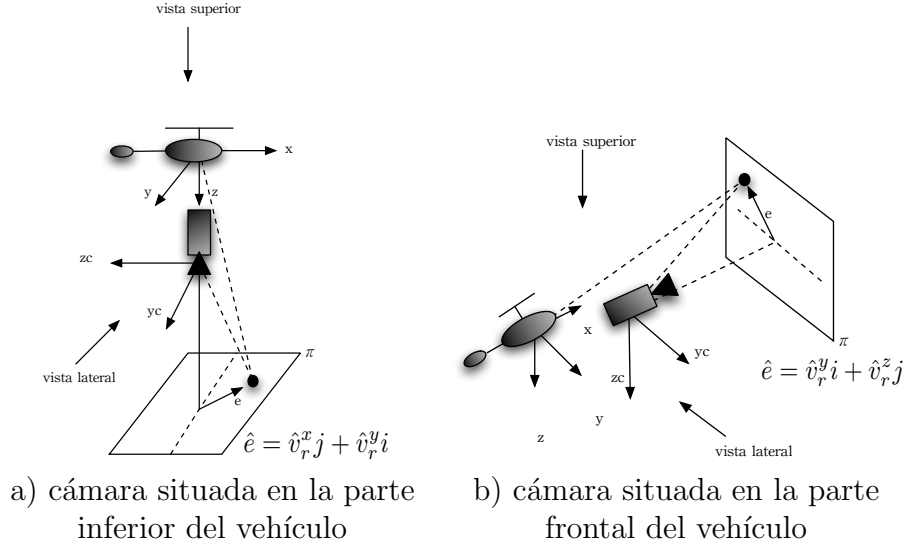


Figura 3.12: Disposición del helicóptero y la cámara, cámara inferior y cámara frontal. La señal de error se indica en forma vectorial, para expresar que consta de dos componentes de referencia de velocidad en la dirección j e i de la imagen.

como parámetro para la generación de la señal de referencia de la tarea de control visual la coordenada i de la posición de la características en la imagen. Un razonamiento análogo se aplica en el caso en el que la cámara esta situada en la parte frontal del vehículo, figura 3.13(b).

En ambas configuraciones se usa la coordenada i de la característica en la imagen, siendo las referencias de velocidad lateral válidas para ambas. Estas referencias vienen dadas por la ecuación 3.22 y tiene su origen en la figuras 3.8(a) y 3.8(b).

$$vy_r = k_l \frac{(i - \frac{w}{2})}{w/2} \quad (3.22)$$

Donde w es el ancho de la imagen e i la posición de la característica detec-

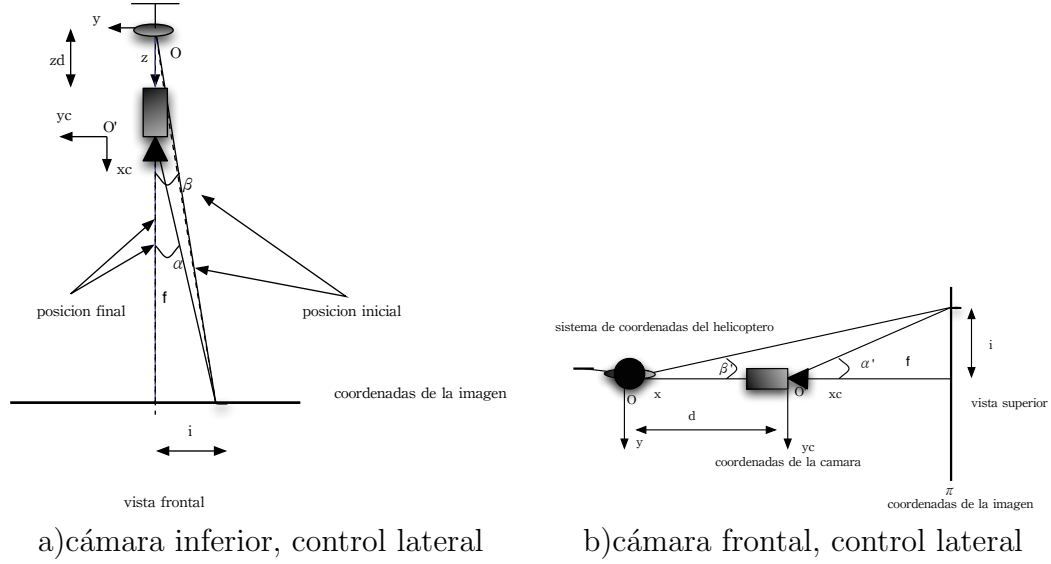


Figura 3.13: Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición lateral

tada en la imagen. k_l se usa como ganancia del sistema visual de referencias laterales. Si su valor es igual 1, las referencias varían entre -1 y 1 (m/s). Si es diferente entonces su valor será k_l veces ± 1 (m/s).

Regresando a la figura 3.13, de ella se puede extraer:

$$\tan \alpha = \frac{i - w/2}{f} \quad (3.23)$$

$$\tan \beta = \frac{i - w/2}{f + z_d} \quad (3.24)$$

$$\tan \alpha' = \frac{i - w/2}{f} \quad (3.25)$$

$$\tan \beta' = \frac{i - w/2}{f + d} \quad (3.26)$$

3.6. Posicionamiento basado en visión. Definición de la tarea de control visual

donde f es la distancia focal de la cámara, d y x_d la distancia que separa ambos sistema de coordenadas, respectivamente. En la practica d y z_d se aproximan a cero colocando la cámara lo más fiel posible al centro de masa del vehículo. Resultando en:

$$\tan \alpha = \tan \beta \quad (3.27)$$

$$\tan \alpha' = \tan \beta' \quad (3.28)$$

El control visual tiene la función de hacer que la componente i de la señal de error tienda a $\frac{w}{2}$ (característica centrada en la imagen) con velocidad negativa, esto es, a medida que el vehículo se alinea con el objetivo, $i \rightarrow \frac{w}{2}$, esto genera referencias positivas de velocidad al helicóptero y los ángulos α' y β' tienden a cero, causando a su vez $vy_r \rightarrow 0$. Por lo tanto, al ser los ejes longitudinales de la cámara y el helicóptero solidarios, el helicóptero se mueve lateralmente por medio de las referencias de velocidad dadas por la ecuación 3.22.

3.6.2. Control visual vertical

Por medio de un razonamiento análogo al anterior, la velocidad y la posición vertical del helicóptero, son controladas por las referencias de velocidad vertical generadas a partir de la imagen. Para generar estas referencias se usa la coordenada j de la característica en la figura 3.8(b). Estas referencias vienen dadas por la ecuación 3.29.

$$vz_r = k_v \frac{(j - \frac{h}{2})}{h/2} \quad (3.29)$$

Donde h es el alto de la imagen y j la posición de la característica detectada en la imagen. Análogamente al caso anterior k_v es la ganancia de sistema

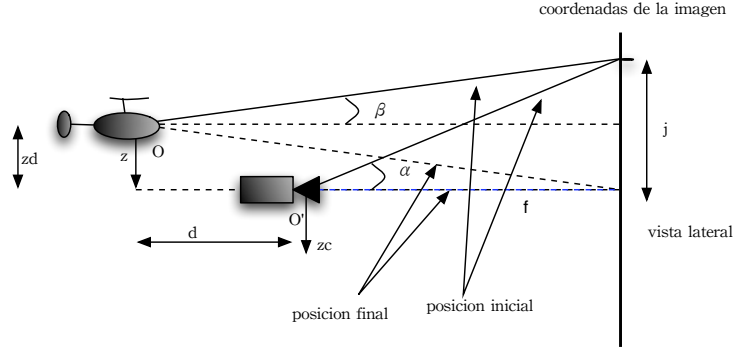


Figura 3.14: Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición vertical (altitud)

visual de referencias verticales.

De figura 3.14, se puede extraer:

$$\tan \alpha = \frac{j - h/2}{f} \quad (3.30)$$

$$\tan \beta = \frac{j - z_d - h/2}{f + d} \quad (3.31)$$

A medida que el control visual corrige la posición del vehículo, la característica tiende a centrarse en la imagen, luego la componente j de la señal de error ($j \rightarrow \frac{h}{2}$), y el ángulo α tiende a cero. No así, el ángulo β que tiende a $\frac{-z_d}{f+d}$. Esto conlleva a que cuando la característica está centrada en la imagen, verticalmente el vehículo no está alineado con el objetivo, debido al factor z_d . Físicamente se ha encontrado que esta distancia es muy pequeña, por lo que en la práctica no se distingue su efecto y se desprecia.

3.6.3. Control visual longitudinal

De manera similar a los planteamientos anteriores, la velocidad y la posición longitudinal del helicóptero, serán controladas por las referencias de

3.6. Posicionamiento basado en visión. Definición de la tarea de control visual

velocidad generadas a partir de la imagen. Para generar estas referencias se usa la coordenada j de la característica en la imagen 3.8(a). Estas referencias vienen dadas por la ecuación 3.32. Extrayendo de la figura 3.15, la vista lateral:

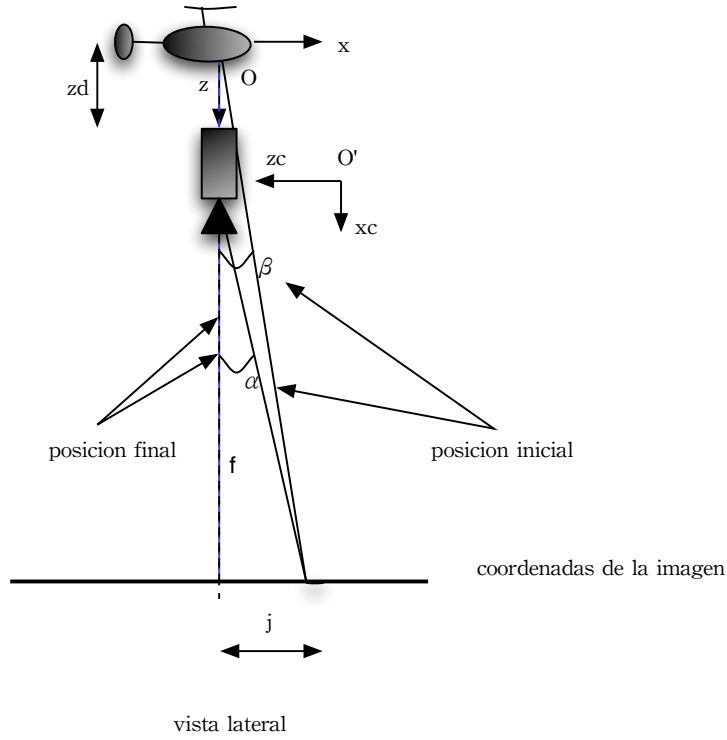


Figura 3.15: Disposición helicóptero-cámara: control visual de posición longitudinal

$$vx_r = -k_L \frac{(j - \frac{h}{2})}{h/2} \quad (3.32)$$

donde h es el alto de la imagen y j la posición de característica detectada en la imagen. El signo menos viene justificado por el razonamiento hecho

en el apéndice B (Ecuación B.15). Análogamente al caso anterior k_L es la ganancia de sistema visual de referencias longitudinales.

De figura 3.15, se puede extraer:

$$\tan \alpha = \frac{j - h/2}{f} \quad (3.33)$$

$$\tan \beta = \frac{j - h/2}{f + z_d} \quad (3.34)$$

A medida que la característica se centra en la imagen la componente j tiende a $\frac{h}{2}$, lo que conlleva a que los ángulos α y β tienden a cero. Con lo que se verifica la convergencia del control longitudinal

3.7. Seguimiento de características sobre secuencias de imágenes

Uno de los problemas más importantes y estudiados en control visual es el como *seguir* (to track) una característica o conjunto de ellas sucesivamente en una secuencia de imágenes. El problema puede separarse en varias partes:

- Como seleccionar eficientemente las características más adecuadas en la imagen. La elección tiene relación con el hecho de como escoger aquellas características que garantizan un seguimiento mas robusto durante la secuencia de imágenes.
- Detectada una característica o conjunto de ellas en la imagen actual, cual será su posición en la imagen siguiente?. Este puede ser considerado como un problema de *estimación de movimiento*.
- Una vez encontrada la posible ubicación de las características en la imagen siguiente, cual de entre varias opciones posibles (de haber más de una) es nuestra característica? Este puede ser considerado como un problema de *correspondencia* [Ullman, 1979].

3.7.1. Selección de características

La literatura de visión por computador define una *característica* como aquella propiedad que se puede extraer de la imagen y que sirve para describirla. Una característica saliente es aquella que puede ser detectada inequívocamente desde diferentes vistas de la escena. En general existen muchos tipos de características adecuadas para el seguimiento. Por ejemplo, líneas, esquinas, área y color, bordes, curvas y/o contornos, etc. Pero la elección de una u otra depende del contexto y la aplicación final. Algunas características usualmente tienen la propiedad de ser más sobresalientes que otras en algunas situaciones, por esta razón el algoritmo debe ser capaz de escoger de entre las disponibles la mejor característica para el seguimiento. En [Collins and Liu, 2003] se presenta un método para la selección de la mejor característica para el seguimiento. Después de una fase en que el algoritmo se entrena el método es capaz de robustamente aislar el objeto seguido del fondo y otras formas.

Hasta la fecha la comunidad de visión por computador ha favorecido la extracción de bordes como características sobresalientes en la imagen. Uno de los métodos más populares ha sido el detector de canny [Canny, 1986], este algoritmo ha probado tener buen desempeño y robustez, el hecho de ser fácilmente paralelizable lo ha favorecido.

Existen otros métodos que obtienen los puntos de máxima curvatura de una imagen utilizando directamente los valores de los píxeles, sin realizar el paso previo de obtención de aristas. Estos métodos definen una medida que suelen denominar de *esquinidad* o C la cual se calcula para todos los puntos de la imagen. Cuando esta medida supera un cierto umbral se considera que el punto es una esquina. La mayoría de estos métodos utilizan operadores diferenciales. Uno de los primeros métodos para la obtención de puntos característicos se describe en [Moravec, 1977]. Dada una ventana rectangular, este operador calcula el valor de cambio de la intensidad de la imagen cuando desplazamos ligeramente esta ventana. Una esquina viene

caracterizada por elevados cambios de intensidad. Los primeros operadores para calcular el valor de C descritos en [Kitchen and Rosenfeld, 1982], [Beaudet, 1978] usaban derivadas de segundo orden, desafortunadamente éstos son altamente sensibles al ruido. Posteriormente en [Harris and Stephens, 1988] se sigue investigando basándose en las ideas de Moravec pero calculando las derivadas de primer orden, lo que lo hace menos sensible al ruido. Este método se conoce como el **Detector de Harris** y es explicado en detalle en el capítulo 5.

Otros detectores de puntos característicos que han sido usados en diferentes aplicaciones son el Detector de Smith [Smith, 1992] el cual no usa términos derivativos. Otro operador denominado SUSAN [Smith and Brady, 1997] ha probado recientemente ser robusto y sobre todo rápido. Este método tampoco usa términos derivativos. Varios trabajos recientes ([Ashbrook, 1992], [Quevedo, 2000], [Roberts, 1994]) hacen un análisis y comparativa entre estos métodos. Estos trabajos han servido de base para seleccionar el mejor detector. Dado el enfoque de esta tesis doctoral como es el de desarrollos en entornos *exteriores*, para nuestras aplicaciones ha resultado el *detector de Harris* el más apropiado. Un análisis complementario se hace en la sección 5.5.2 del capítulo 5.

3.7.2. Estimación del movimiento en las características

Los métodos de estimación pueden resumirse en determinísticos y probabilísticos. Seguidamente se presenta un resumen de ambos.

3.7.2.1. Métodos determinísticos

Los métodos determinísticos son usados para localizar la posición absoluta, y su estimación es única. La característica principal de estos métodos es que el resultado es un valor concreto y no una función de probabilidades de la estimación en la posición. Si bien, esta única solución ignora la

3.7. Seguimiento de características sobre secuencias de imágenes

incertidumbre en las observaciones de la medida, no obstante facilita otro aspecto importante en el seguimiento visual, como es el aprendizaje adaptativo basado en apariencia. En [Jepson et al., 2003] se presenta un método adaptativo basado en métodos determinísticos.

Los métodos determinísticos por lo general se reducen a un problema de optimización, es decir, a la minimización de una función de coste. El problema radica en la definición de la función de coste. Una elección muy común es SSD, suma de los cuadrados de las diferencias, la cual es muy usada en métodos basados en flujo óptico [Hager and Belhumeur, 1998], el mínimo es encontrado usando un algoritmo basado en gradiente descendiente [Press et al., 2002] o un método estocástico. Ambos son métodos iterativos de optimización, pero el gradiente descendiente es más ampliamente usado dada su rápida convergencia. La posición donde la función de coste tiene su mínimo es considerado la posición del objeto.

3.7.2.2. Métodos probabilísticos

Al contrario de los métodos determinísticos, los métodos probabilísticos hacen explícita la incertidumbre en el seguimiento visual. Estos métodos representan el resultado a través de una distribución sobre los posibles estados. En el seguimiento, esta distribución se propaga a lo largo de las imágenes basándose en nuevas observaciones y en las restricciones en la transición entre estados. La propagación de las distribuciones en el seguimiento visual ha sido explorada en [Isard and Blake, 1998]. Bajo la aproximación de que una imagen puede ser vista como una función no-lineal de coordenadas espaciales, usualmente las probabilidades lineales de distribución gaussianas no representan adecuadamente la distribución de los estados sobre todas aquellas posibles posiciones del objeto en la imagen. Por esta razón los filtros de partículas [Arulampalam et al., 2002] son usados para representar la distribución de estados. Los métodos probabilísticos han demostrado ser robustos en la mayoría de las situaciones. Esto se debe en parte a que su

naturaleza probabilística es adecuada al seguimiento visual donde la incertidumbre es alta. Una vez la distribución de estado ha sido determinada, la media de la distribución es usualmente usada como la posición del objeto en la imagen. En los métodos probabilísticos la estimación es una distribución y no un valor absoluto. Usando la media para representar la posición crea un problema de localización. Aunque esta media en ocasiones no esta cercana al objeto, la distribución total es una estimación correcta de la localización del objeto. Se suele afirmar que esta naturaleza probabilística previene que el seguimiento sea adaptativo, para ello es necesario que el objeto sea localizado de manera precisa. Entre los primeros trabajos basados métodos probabilísticos usando el filtro de kalman se encuentran [Broida et al., 1990] y [Azarbayejani and Pentland, 1995].

3.7.3. Métodos de seguimiento – tracking

Existen diferentes maneras de como seguir un conjunto de características o un objeto en la imagen. Esta correspondencia puede basarse en la apariencia del conjunto u objeto. La apariencia puede considerarse como un conjunto propiedades que caracteriza el objeto, forma, intensidad local, niveles locales de gris, etc. Sí en lugar de la apariencia, se usa el conocimiento previo de cómo el objeto es y se representa mediante un modelo, la correspondencia se haya ajustando este modelo a lo largo de la secuencia de imágenes para saber donde se encuentra el objeto en la imagen.

El seguimiento de características es uno de los problemas vitales cuando se usa visión para la estimación de movimiento. El seguimiento a su vez se puede descomponer en dos subproblemas como son: predicción y correspondencia [Roberts, 1994]. La predicción, debido a factores como el ruido y movimiento aleatorio, conlleva a una predicción errónea y nunca es del todo precisa. Por lo que es muy común usar regiones de interés.

A continuación se presenta la ideas más generales de estas técnicas.

3.7.3.1. Basados en apariencia

Si bien estos métodos usan una medida de similitud entre imágenes para detectar y seguir el objeto. Dependiendo del área, tipo de característica o patrón se pueden subdividir en:

- *Basados en ventanas*, Cuando el tamaño, información y tipo de procesamiento de la imagen es considerable, el procesamiento en tiempo real es intratable. El tiempo de procesamiento puede ser reducido en gran parte si se definen ventanas o zonas de interés. El seguimiento se realiza sólo procesando la información contenida en la ventana, con lo se reduce la cantidad de operaciones y así el tiempo de análisis. Los métodos basados en ventana son computacionalmente sencillos y de fácil reconfiguración, pero la inicialización de la ventana en ocasiones presupone la intervención del usuario. El movimiento interframe es otro factor a tener en consideración al usar estos métodos, ya que si éste es mayor al tamaño de la ventana el seguimiento es irrealizable.
- *Basados en patrón*, En términos generales un patrón o plantilla se define como una pequeña region (o parche) conteniendo características. El algoritmo de seguimiento usa este patrón para realizar una búsqueda en la imagen siguiente y encontrar cual es el área de mayor similitud a aquella contenida en el patrón. Las características contenidas en el patrón pueden ser curvas [Kass et al., 1988], [Isard and Blake, 1998], patrones o parches [Jepson et al., 2003], [Olson, 2000] o modelos reducidos de probabilidad. Usualmente los algoritmos que usan patrones tienen un desempeño superior en la localización de los objetos que aquellos basados en áreas o regiones. Olson [Olson, 2000] propuso un método para estimar la posición de un objeto robustamente en términos de probabilidad máxima. El valor máximo de la función de probabilidad y la distribución normal se fusionan para proveer resolución subpixel en la localización.
- *Basados en bordes o curvas*, Kass, Witkin y Terzopoulos desarrollaron *Active Contour Models* [Kass et al., 1988] para representar contornos

bidimensionales. El seguimiento se consigue ajustando continuamente el modelo del contorno con las curvas detectadas en la imagen, minimizando una función de coste que define energía en términos de la fuerza que ejerce cada contorno con el resto. Los contornos son propiedades muy robustas e invariantes a muchos cambios de iluminación. En contraste Isard y Black [Isard and Blake, 1998] usan un conjunto de splines que son extraídos del objeto y luego pasados al algoritmo que denominan *condensation* que usa filtros de partículas para representar la distribución de la posición actual del objeto. El uso de contornos o curvas requiere que los contornos sean constantes en forma de manera de conseguir un seguimiento eficiente y preciso. Es difícil e ineficiente en ocasiones manejar cambios de contornos en el objeto.

3.7.3.2. Basados en modelos

El seguimiento basado en modelo usa un patrón físico del objeto en lugar de sólo su apariencia. A diferencia de los métodos basados en apariencia, este método posee el conocimiento de cómo es el objeto a seguir, y usa este conocimiento para representar ese objeto mediante un modelo. El seguimiento se realiza ajustando este modelo a lo largo de la secuencia de imágenes para encontrar el objeto. Usualmente este modelo es 3D, teniendo la información del objeto el algoritmo tiene la habilidad de manejar la mayoría de las situaciones. La dificultad de los métodos basados en modelos radica en que tan fiel es el modelo, en ocasiones adquirir el modelo del objeto se convierte en una tarea ardua. En [Lowe, 1991] un simple modelo basado en polyhedron es usado para el seguimiento. En la práctica, sin embargo, el objeto es mucho más complicado para ser representado de esta forma. El cómo obtener modelos 3D y hacer un seguimiento robusto de modelos 3D más complejos es todavía un problema de estudio en visión por computador.

3.8. Conclusiones

Los fundamentos en cuanto a control visual y seguimiento de características se han presentado en el capítulo. Las definiciones del control servo visual para robots articulados se han mostrado en términos generales, y definiendo algunas restricciones se han aproximado al caso del control visual de un helicóptero autónomo. El punto de partida de que la cámara y el helicóptero son solidarios nos ha permitido partiendo del modelado dinámico de la cámara validar el esquema de control visual planteado, como es el control de la posición 2D del helicóptero generando directamente las referencias del plano de la imagen. Por medio de la experimentación se valida la propuesta, presentando en el capítulo 5 diferentes trabajos y configuraciones donde se han usando las técnicas anteriormente descritas.

En cuanto a los diferentes métodos de seguimiento de características el factor determinante es la robustez y fiabilidad. Considerando que el sistema visual es el responsable de generar las referencias de control durante la tarea, esta condición es indispensable. La aplicación final del sistema determina basándose en las bondades y desventajas de cada esquema de seguimiento, la elección de uno u otro.

La definición del tipo de control visual, la tarea control y el método de seguimiento de características es el paso previo y preámbulo a el siguiente capítulo donde se define la estructura de control de vuelo y la integración de las referencias visuales en este control.

Capítulo 4

Diseño del control de vuelo con retroalimentación visual

4.1. Introducción

El diseño del controlador de vuelo es una tarea ardua debido a la inherente inestabilidad del helicóptero, dada su dinámica acoplada y no lineal. A pesar de esto, cuando se considera el helicóptero en vuelo estacionario y/o a baja velocidad (<4 m/s), técnicas de control lineal clásico pueden ser utilizadas. Es posible generar un modelo aproximado de la dinámica para el control de actitud del helicóptero, linealizando el modelo –no lineal– alrededor de un punto de funcionamiento, por ejemplo vuelo estacionario, y despreciando el acoplamiento entre la dinámica traslacional y de actitud. Una completa descripción sobre el modelo matemático, identificación y control de actitud de un minihelicóptero en vuelo estacionario se puede encontrar en [Gil, 2000].

Los diferentes movimientos del helicóptero son generados al influir sobre

los ángulos de actitud y la fuerza de elevación. El helicóptero, al igual que su versión real tripulado, puede ser controlado a través de cuatro comandos, el pitch colectivo de rotor principal, pitch colectivo de rotor de cola, pitch cíclico longitudinal y pitch cíclico latitudinal. La simbología seguida para estas magnitudes es:

δ_{lon}	pitch cíclico longitudinal
δ_{lat}	pitch cíclico latitudinal
δ_t	pitch colectivo rotor cola
δ_m	pitch colectivo rotor principal

El movimiento vertical del helicóptero depende de la relación entre su peso y la fuerza de elevación generada por las palas del rotor principal. La fuerza de elevación se genera inclinando individualmente y en la misma proporción las palas del rotor principal. Esta fuerza es perpendicular al plano de rotación y es controlada por el pitch colectivo de rotor principal. El movimiento longitudinal se genera al inclinar un ángulo dado con respecto a la horizontal el plano de rotación de las palas del rotor principal *-pitch-* arriba o abajo, esta inclinación puede ser controlada con el pitch cíclico longitudinal. El movimiento lateral se genera al inclinar un ángulo dado el plano de rotación de las palas del rotor principal *-roll-* lateralmente, esta inclinación es controlada por el pitch cíclico latitudinal. El movimiento de rotación sobre el eje del rotor principal *-yaw-* se genera influyendo sobre el rotor de cola. De manera similar al rotor principal, se genera una fuerza perpendicular al plano de rotación que produce una mayor o menor resistencia al momento generado por la rotación del rotor principal. La magnitud de esta fuerza genera la rotación sobre el eje del rotor principal y es controlada por pitch colectivo rotor de cola.

Desde la perspectiva de esta tesis doctoral, el control de vuelo se simplifica asumiendo que los modos de funcionamiento son solo dos, vuelo estacionario y vuelo longitudinal. Ya que el vuelo lateral se considera una variante del

vuelo estacionario por realizarse, éste a muy baja velocidad.

El funcionamiento autónomo de un helicóptero se basa principalmente en dos etapas. En primer lugar, un estimador de estado, que fusionando las lecturas de los diferentes sensores permite conocer su posición y orientación en todo momento, y en segundo lugar el control de vuelo que le permite moverse de una coordenada a otra. El objetivo perseguido en esta tesis doctoral por el control de vuelo puede resumirse a continuación:

- Dada una coordenada GPS de un punto o serie de coordenadas GPS, se debe guiar el helicóptero hasta tal coordenada o a través de ellas. Esta maniobra contempla el guiado a través de un control de posición y velocidad.
- Una vez se alcanza la posición deseada definida por la coordenada, se cambia –basándose en ciertas reglas– al control basado en visión, cuyo objetivo es alinear el helicóptero con la característica u objeto de seguimiento.

4.1.1. Esquema de control

El control de vuelo esta compuesto por varios lazos de control en cascada para controlar actitud, velocidad y posición. Cada controlador genera las referencias al controlador siguiente, siendo el control de actitud el que genera las consignas finales a los servos del helicóptero.

Los diferentes lazos de control mencionados anteriormente leen el estado de las variables del estimador de estado y estabilizan el helicóptero en un punto de operación basándose en controladores PID desacoplados. La maniobrabilidad del vehículo autónomo considerado, el helicóptero, como se mencionó puede ser controlada modificando los ángulos de actitud, es decir, actuando sobre el *roll*, *pitch* y *yaw*. El control de actitud lee los valores de roll, pitch y yaw, y genera las consignas necesarias para estabilizar la actitud del helicóptero. El control del roll y pitch se implementa mediante dos

controladores PD, el control del yaw se hace mediante un controlador PID. La ecuaciones que rigen el control de actitud se muestran a continuación:

$$\delta_{lat} = K_p(\phi_d - \phi) + K_d \frac{(\phi_d - \phi)}{dt} \quad (4.1)$$

$$\delta_{lon} = K_p(\theta_d - \theta) + K_d \frac{(\theta_d - \theta)}{dt} \quad (4.2)$$

$$\delta_t = K_p(\psi_d - \psi) + K_i \int (\psi_d - \psi) dt + K_d \frac{(\psi_d - \psi)}{dt} \quad (4.3)$$

donde: δ_{lat} , δ_{lon} and δ_t son los comandos de pitch cíclico latitudinal, pitch cíclico longitudinal y colectivo de rotor de cola, respectivamente. Los valores de K_p , K_i and K_d las ganancias proporcional, integral y derivativa asociadas a cada controlador.

El control de velocidad, el cual genera referencias de roll, pitch (al control de actitud) y colectivo de rotor principal, esta implementado mediante un control PI. El controlador lee los valores de velocidad del estimador de estado y genera: ϕ_d y θ_d al control de actitud lo que desplaza el vehículo lateral y longitudinalmente a una velocidad dada, respectivamente. La velocidad vertical que se controla actuando sobre el colectivo de rotor principal, se puede modificar por medio del control de velocidad o posición dependiendo del modo de operación. Cuando el vehículo se mueve hacia una coordenada GPS dada, el control de posición genera consignas de colectivo principal basándose en la altura actual y la deseada. Cuando se está en vuelo estacionario o se opera en modo velocidad, el control de velocidad es capaz de recibir referencias externas generando consignas de colectivo principal directamente. Este modo de operación es particularmente útil cuando se realiza control visual.

$$\phi_d = vx_r = K_p(vx_d - vx) + K_i \int (vx_d - vx) dt \quad (4.4)$$

$$\theta_d = vy_r = K_p(vy_d - vy) + K_i \int (vy_d - vy)dt \quad (4.5)$$

$$\delta_m = K_p(vz_d - vz) + K_i \int (vz_d - vz)dt \quad (4.6)$$

donde: vx_r , vy_r and δ_m son la referencias de velocidad longitudinal, velocidad latitudinal y colectivo de rotor principal, respectivamente. Los valores de K_p y K_i son las ganancias proporcional e integral asociadas a cada controlador. En la configuración de control en cascada cada controlador genera los setpoints (referencias) al controlador siguiente, por esta razón las ecuaciones 4.4 y 4.5 son los valores deseados de entrada al controlador de actitud, mientras que la ecuación 4.6 es el valor del comando de colectivo del rotor principal.

El control de posición se implementa mediante un controlador PID. Cuando se vuela en dirección a una coordenada dada o se está en vuelo estacionario, el controlador lee las coordenadas GPS deseadas y la actual, y genera las referencias de velocidad al control de velocidad del vehículo y colectivo de rotor principal.

$$vx_d = x_r = K_p(x_d - x) + K_i \int (x_d - x)dt + K_d \frac{(x_d - x)}{dt} \quad (4.7)$$

$$vy_d = y_r = K_p(y_d - y) + K_i \int (y_d - y)dt + K_d \frac{(y_d - y)}{dt} \quad (4.8)$$

$$vz_d = z_d = K_p(z_d - z) + K_i \int (z_d - z)dt + K_d \frac{(z_d - z)}{dt} \quad (4.9)$$

De manera similar, al control de velocidad el control de posición genera las referencias al controlador siguiente. El controlador enseguida es el de velocidad, por esta razón la ecuacion 4.7 y 4.9 se pueden escribir como las referencias de velocidad. Sin embargo, dependiendo del modo de operación el control de posición puede generar directamente la consigna de pitch colectivo de rotor principal influyendo sobre la altitud del helicóptero.

4.2. Integración con referencias visuales

El objetivo planteado durante el desarrollo de esta tesis doctoral ha sido el diseñar robots aéreos guiados por visión. La visión por computador le permite a tales robots servir de visores inteligentes en el espacio aéreo en numerosas aplicaciones. La integración de la visión por computador en el control de vuelo implica otros campos de investigación como la detección y seguimiento de patrones, estimación de posición por flujo óptico, navegación inercial, GPS, modelado no lineal, etc.

Durante el procesamiento de imágenes, al realizarse la detección y seguimiento en el plano de la imagen, las referencias más apropiadas que puede generar esta etapa son de velocidad en el plano de la imagen, lo que representa a su vez las referencias de velocidad al control de vuelo en el sistema de coordenadas del helicóptero.

La configuración actual propuesta (figura 4.1) del sistema es descoplado y basado en imagen, es decir, la señal de error a corregir es la posición de la característica en la imagen. En la mayoría de los casos planteados en el capítulo 5, la visión se usa para alinear el UAV con el objeto de interés por lo que la convergencia de esta señal a cero valida la configuración propuesta.

4.2.1. Capa de interconexión entre procesos

Esta capa hace uso de una arquitectura conocida como es la cliente-servidor. Esta arquitectura esta basada en mensajes TCP/UDP y esta orientada a que los procesos embebidos se ejecuten a bordo del vehículo. Anteriormente en la sección 3.4 se describió como son generadas las referencias visuales de velocidad del plano de la imagen. Su integración con el control de vuelo se lleva a cabo mediante mensajes, a través de una capa de software definida por una API de comunicaciones. Esta capa permite la interconexión de diferentes procesos externos simultáneamente .

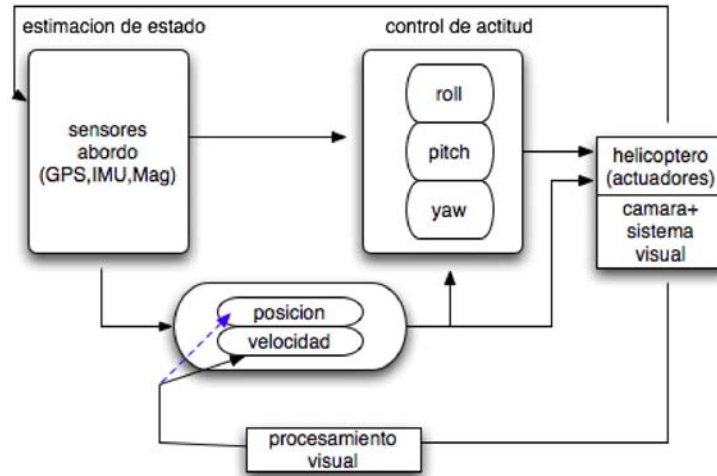


Figura 4.1: Diagrama general de control. Se muestra la configuración desacoplada del sistema de visión

El esquema propuesto tiene la ventaja de ser enormemente flexible, dado que varios procesos externos pueden inter-actuar entre ellos y con el control de vuelo a través de la capa de conexión, vease figura 4.2. En el caso del uso de la visión por computador para el control visual, dicha flexibilidad viene del hecho de que varios sub-procesos de visión, y entiendase por sub-procesos como, algoritmos dedicados a tareas y/o aplicaciones específicas, pueden inter-actuar a la vez. En el caso de requerir algoritmos de propósito especial, el esquema sigue siendo válido ya que solo requerirá el cambio interno del proceso de visión.

Las funcionalidades básicas de esta capa se definen como:

- Definir un conjunto de mensajes para identificar el tipo de información, así como el destino del mensaje. Mensajes y estructuras de datos son definidas, y luego enviados a la capa de interconexión. Diferentes mensajes son creados para el control de vuelo como: control de velocidad, control de posición, orientación, actitud, estado del helicóptero,

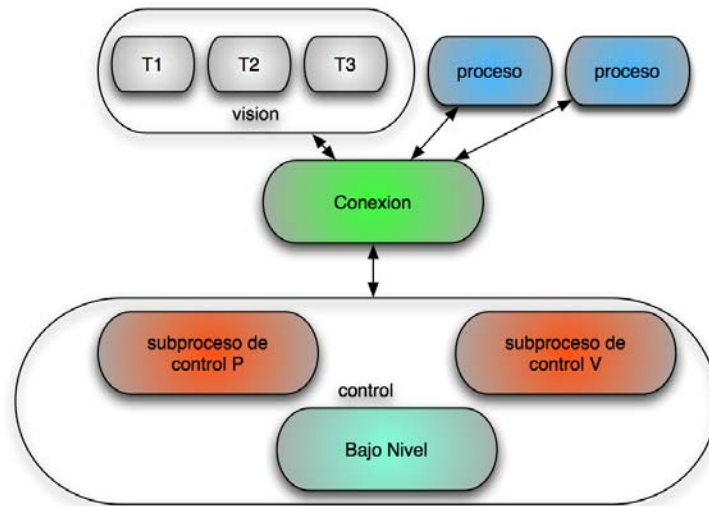


Figura 4.2: Esquema de procesos. Procesos externos (nivel superior) inter-actúan con el control a través de una capa de conexión

etc. Para procesos externos como: tipo de información a enviar y recibir, desde y hacia los procesos externos.

- Conmutar y enrutar los mensajes dependiendo del tipo de información contenida. Por ejemplo, la capa puede cambiar entre control de velocidad o posición dependiendo del tipo de mensaje recibido desde un proceso externo.

La siguiente tabla muestra un resumen los mensajes creados para el control de vuelo:

Cuadro 4.1: Principales mensajes para el control de vuelo

ID	Enumeration	Estructura
10	AHRS_STATE: estado del general vehículo	state.t
11	PPM: señal ppm enviada a los servos por la emisora	ppm.t
14	AUTOPILOT_STATE: estado del sistema en modo automático. valores deseados para el estado del vehículo	autopilot_state.t
16	FLYTO: modo de control de posición	msg_flyto.t
21	TELEOP_CMD: modo de control de velocidad	msg_teleop.t
19	PLATFORM: controla el tilt y el pan de la plataforma de la cámara	platform.t
20	DESIRED_POSITION: respuesta del control al mensaje flyto, es donde el sistema trata de ir	msg_desired_pos.t
23	VELSCALE: factor de escala para las referencias de velocidad	msg_velscale.t

La siguiente tabla muestra un resumen los mensajes creados para procesos externos, por ejemplo comunicaciones entre procesos de visión y una interfaz en tierra:

4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo

Cuadro 4.2: Principales mensajes para procesos externos

ID	Enumeration	Estructura
200	VISION_STATE: estado del general de las variables relacionadas con el proceso de visión	msg_vision_out_t
201	VISION_COMMANDS: comandos enviados al proceso de visión desde procesos externos para controlar el comportamiento del proceso	msg_vision_in_t

En el apéndice C se muestran los valores de las estructuras de datos definidas para el intercambio de mensajes.

4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo

La siguiente sección presenta una vista general del comportamiento del control en vuelo autónomo. Las gráficas y análisis mostrados a continuación pertenecen a vuelos autónomos basados en GPS, es decir, el sensor principal para el posicionamiento será el GPS. Cabe destacar que la plataforma empleada COLIBRI [COLIBRI, 2005] ya ha sido utilizada durante numerosas horas de vuelo sirviendo de plataforma principal para la experimentación y desarrollo de esta tesis doctoral.

La gráfica 4.3 muestra la señal característica del control de vuelo que indica cuando el sistema esta siendo controlado manualmente y cuando esta en modo autónomo. De esta gráfica se extrae el siguiente intervalo de tiempo comprendido entre $200 < t < 970$ segundos, donde el helicóptero vuela en modo autónomo realizando diferentes maniobras durante un periodo de 12 minutos aproximadamente. Es en este periodo donde se recogen las señales más significativas del control de vuelo como son velocidad, posición y actitud, mostradas a continuación.

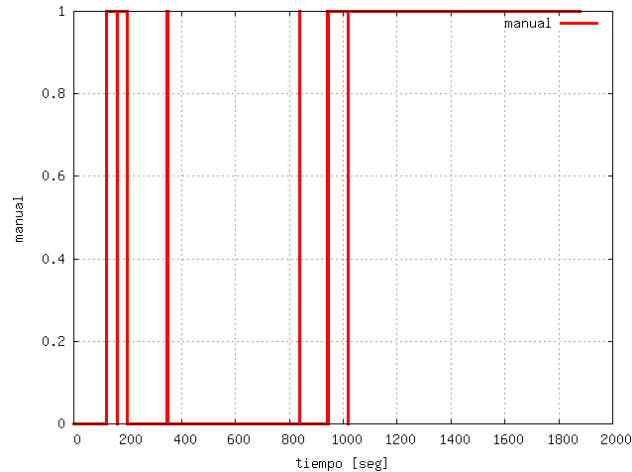


Figura 4.3: Señal de control manual-automático. El valor en alto indica vuelo manual, el valor bajo indica vuelo autónomo

Las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran sólo las señales de actitud, posición y velocidad. Las mismas se muestran tal y cual se registran en la estación de tierra durante la periodo del vuelo autónomo. Seguido a lo largo de esta sección se muestran las correspondencias entre estas señales y los valores comandados, bien sea, por parte del operador o el control de vuelo.

La gráfica 4.7 muestra el desplazamiento del helicóptero correlado con los valores comandados por parte del operador, es decir, los valores de las

4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo

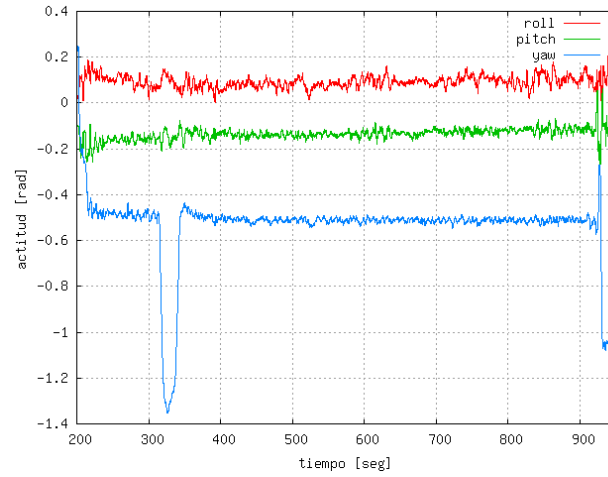


Figura 4.4: Actitud del helicóptero durante vuelo autónomo. Valores de roll (ϕ), pitch (θ) y yaw (ψ), respectivamente

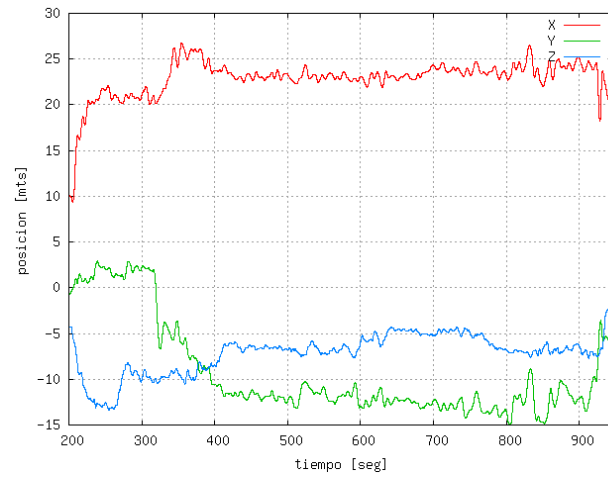


Figura 4.5: Evolución en el desplazamiento del helicóptero durante vuelo autónomo

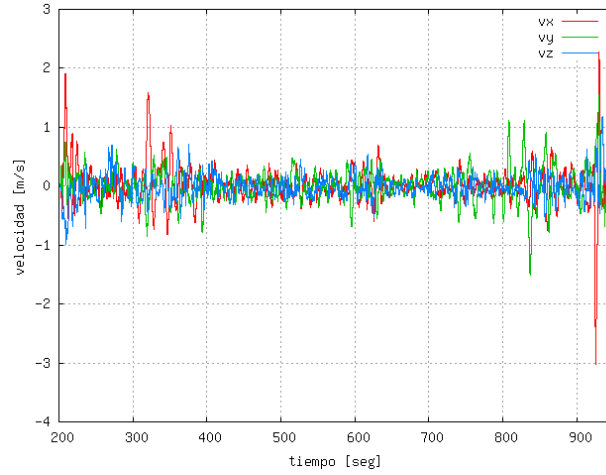


Figura 4.6: Velocidades del helicóptero durante vuelo autónomo. Velocidad longitudinal (vx), lateral (vy) y vertical (vz), respectivamente

coordenadas GPS a donde el helicóptero debe moverse. La diferencia entre el valor deseado y la posición actual es usado como señal de error para el control PID de posición. La salida de este controlador es la entrada del control de velocidad. Dependiendo del modo de funcionamiento la salida del control de posición puede ser usada directamente como señal de control para el colectivo de rotor principal. Adicionalmente, el control de posición proporciona la orientación (ψ_d) con la cual el helicóptero se mueve hacia una coordenada u otra.

La altitud actual del helicóptero (Z) y la altitud deseada (D) se presentan en la gráfica 4.8. La diferencia entre estos valores se usa como señal de error para el controlador PID de altitud. La salida de este controlador es usada como entrada deseada al control de velocidad vertical o como señal de colectivo de rotor principal, dependiendo del modo de funcionamiento, posición o velocidad.

La velocidad vertical actual y la velocidad vertical deseada se muestran

4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo

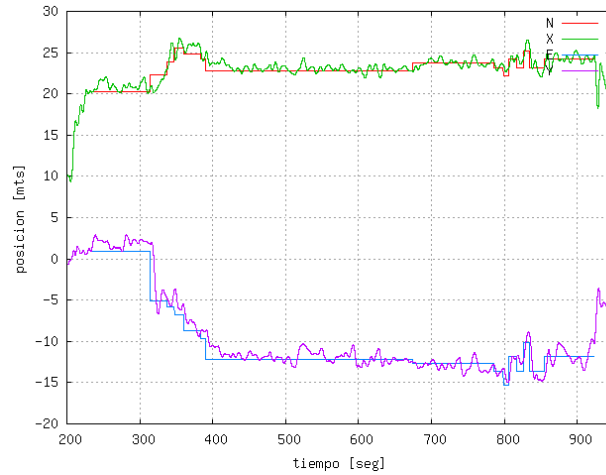


Figura 4.7: Correspondencia entre los desplazamientos lateral y longitudinal en coordenadas del helicóptero durante vuelo autónomo y los valores de referencia en coordenadas NED (desplazamiento comandados, N (Northing) y E (Easting))

en la gráfica 4.11. La diferencia entre la velocidad actual y la deseada se usa como señal de error para controlador PID de velocidad. La salida del controlador de velocidad se usa como valor deseado de entrada para el controlador de actitud y como señal colectivo de rotor principal dependiendo del modo de funcionamiento. Note que la velocidad del vehículo frecuentemente se expresa en coordenadas globales (del mundo), por lo que estas velocidades son transformadas a velocidades en el sistema de coordenadas del helicóptero (body frame) primero y entonces introducidas al controlador. De manera similar, la graficas 4.9 y 4.10 muestran las señales para el caso de la velocidad longitudinal y lateral, respectivamente. El desempeño del control de actitud se muestra a continuación.

La gráfica 4.12 presenta los valores de roll actual y deseado. La diferencia entre estos valores se usa como entrada al controlador PID de actitud. La salida del control de actitud se usa como la señal que comanda los servos

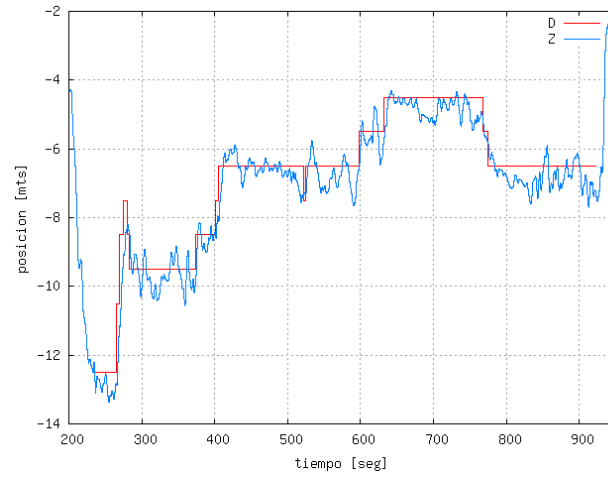


Figura 4.8: Correspondencia entre el desplazamiento vertical (Z) en coordenadas del helicóptero durante vuelo autónomo y el valor comandado (D) en coordenadas NED

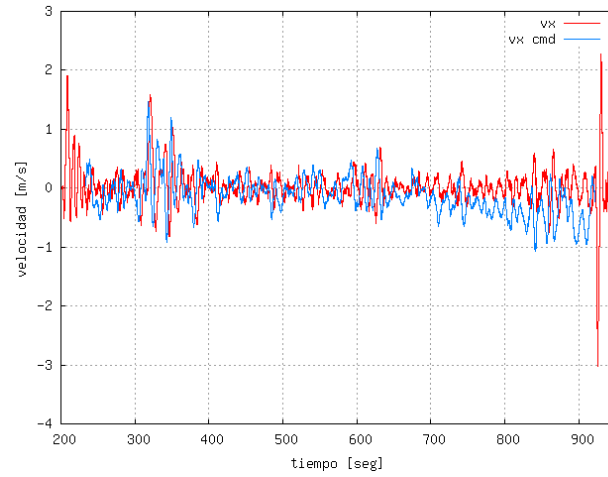


Figura 4.9: Velocidad longitudinal (vx) y velocidad deseada (vx_d) del helicóptero durante vuelo autónomo.

4.3. Comportamiento del Control. Resultados en Vuelo Autónomo

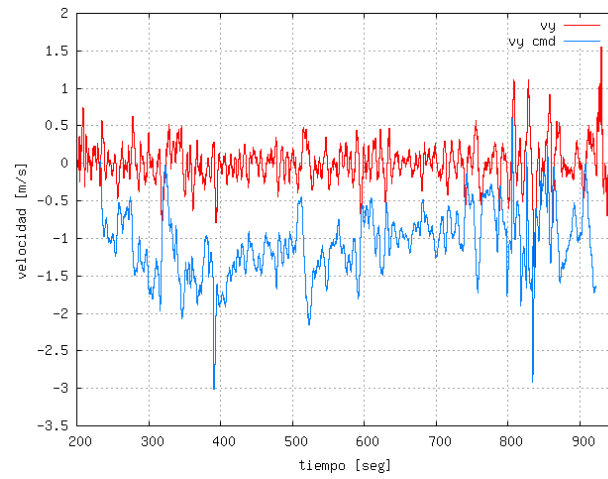


Figura 4.10: Velocidad lateral (v_y) y velocidad lateral deseada (v_{y_d}) del helicóptero durante vuelo autónomo.

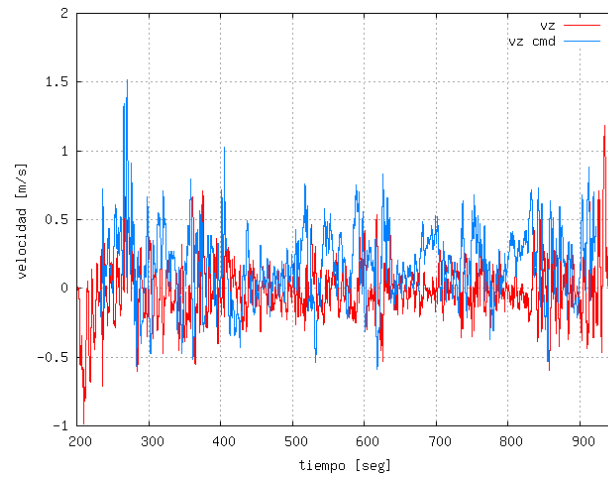


Figura 4.11: Velocidad vertical (v_z) y velocidad deseada (v_{z_d}) del helicóptero durante vuelo autónomo.

directamente, por supuesto, dependiendo del modo de funcionamiento.

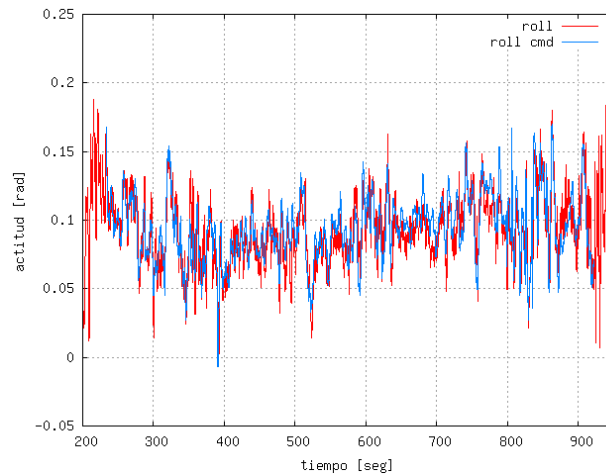


Figura 4.12: Correspondencia entre el roll (ϕ) y el roll deseado (ϕ_d) durante vuelo autónomo

Las gráficas 4.13 y 4.14 muestran los valores actuales y deseados para el pitch y el yaw. Como se mencionó anteriormente, el valor de yaw deseado proviene del cálculo entre la posición actual y la deseada que se realiza en el control de posición. Actualmente el control de vuelo ha sido diseñado de forma que el helicóptero calcula primero la orientación con la cual debe dirigirse de un punto a otro, y continuación mantiene dicho ángulo de referencia hasta alcanzar el punto destino.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se ha descrito la estructura de control de vuelo de un helicóptero autónomo. Leyes clásicas de teoría lineal de control se han usado para el control. Bajo ciertas restricciones estas leyes son válidas permitien-

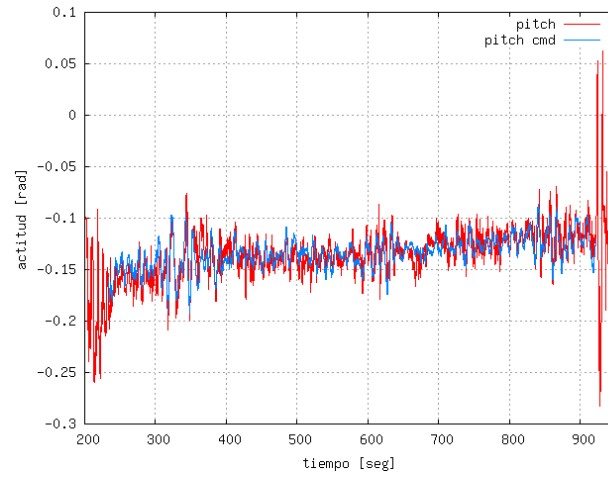


Figura 4.13: Correspondencia entre el pitch (θ) y el pitch deseado (θ_d) durante vuelo autónomo

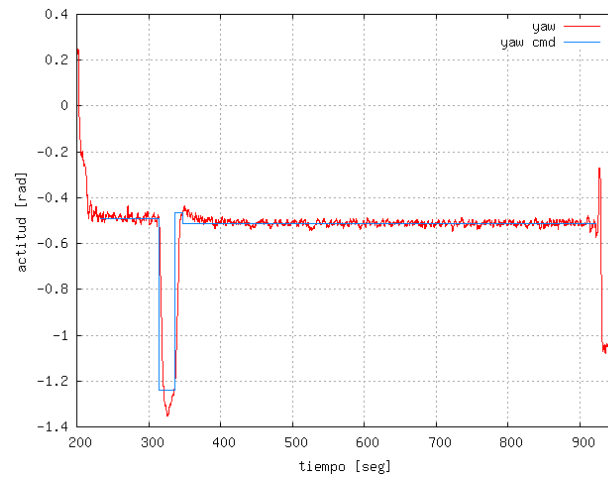


Figura 4.14: Correspondencia entre el pitch (ψ) y el yaw deseado (ψ_d) durante vuelo autónomo

do un desempeño aceptable dentro de un régimen de vuelo dado. Como limitación de este diseño está el hecho de que las tareas que exijan un desempeño mayor al vehículo requerirán de controladores y leyes de control más avanzados. El esquema de integración de las referencias visuales con el control de vuelo se ha mostrado también. La manera desacoplada en que se realiza permite al sistema de visión enviar bien sea, referencias visuales de velocidad o posición. En cuanto a los errores apreciados en las velocidades y en la posición se deben principalmente a factores como son la precisión en las medidas del GPS y al hecho de no tomar en cuenta el error debido al viento. Actualmente no se obtiene ninguna medida de la velocidad del viento, por lo que es difícil cuantizar los errores introducidos por este factor.

La estructura de control permite a procesos externos enviar a éste, referencias de posición y/o velocidad. Esta funcionalidad es particularmente útil cuando se usa visión por computador como sensor principal para el control. Durante el procesamiento visual, dado que la detección y seguimiento se realiza en el plano de la imagen, la forma natural por parte del procesamiento es de generar referencias de velocidad en el plano de la imagen. Lo que representara los valores deseados de velocidad (en el sistema de coordenadas del helicóptero) para el control de velocidad.

Una propiedad relevante de tal esquema es el hecho de permitir interactuar de una manera desacoplada a varios procesos externos con el control de vuelo, sin la necesidad de modificar la estructura interna del control. Las gráficas mostradas en la sección anterior son representativas de vuelos autónomos, es de notar que esta plataforma se usa como sistema principal de prueba habiendo realizado numerosos vuelos autónomos.

Capítulo 5

Aplicaciones experimentales y resultados

5.1. Introducción

Los objetivos planteados en la presente tesis doctoral se han enmarcado en diferentes proyectos a lo largo del desarrollo de la misma. Los planteamientos teóricos, técnicas y aportaciones de la tesis se han visto reflejados en diferentes trabajos experimentales con potencial aplicación en el ámbito industrial. A continuación se mencionan varios de los trabajos mas relevantes, sus objetivos y alcances.

En primer lugar se expone el trabajo realizado durante el proyecto ELEVA: Helicóptero autónomo para la inspección de líneas eléctricas de alta tensión [ELEVA, 2005]. Seguido se presenta un trabajo realizado en la Universidad del Sur de California, en el grupo AVATAR [AVATAR, 2005], trabajo que es complementario al que se presenta como una de las aportaciones más importantes de la presente tesis, como es el control de velocidad lateral,

longitudinal y vertical basado en visión de un helicóptero autónomo enmarcado en el proyecto COLIBRI [COLIBRI, 2005]. Finalmente, se exponen dos trabajos realizados durante estancias de investigación, donde se han puesto similarmente a prueba técnicas expuestas en capítulos anteriores y que constituyen aportaciones adicionales de la presente tesis.

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

El siguiente trabajo se realizó en el marco del proyecto ELEVA: Inspección de líneas eléctricas de alta tensión mediante vehículo autónomo y visión artificial (DPI2000-1561-C02-02), un proyecto coordinado entre la división de ingeniería de sistemas y automática (DISAM), la Universidad Carlos III y con la financiación del Red Eléctrica de España y la comisión interministerial de ciencia y tecnología.

Los objetivos a cumplir en este proyecto fueron los siguientes:

- Diseñar los algoritmos de visión artificial capaces de tratar imágenes y detectar de ellas segmentos de líneas rectas, correspondientes a los conductores de alta tensión.
- Uso de técnicas de control visual para el seguimiento de la línea, así como el hardware necesario para acometer dicha tarea.
- El sistema debía ser capaz mediante técnicas de estereoscopia de generar referencias 3D, con respecto a la línea de alta tensión.
- El criterio de diseño del sistema debía ser considerado por tratarse de un sistema embebido a bordo del helicóptero, por lo que se diseñó la arquitectura más adecuada

Como resultado de la concepción de los objetivos del proyecto se construyó un sistema embarcado en un helicóptero a escala. A continuación se describe el sistema.

5.2.1. Detección y seguimiento de líneas eléctricas de alta tensión

El sistema visual consiste en un par estereoscópico colocado sobre una estructura y dispuesto en la parte frontal del helicóptero, figura 5.1.



Figura 5.1: Sistema desarrollado durante vuelo. Vista del sistema estereoscópico colocado en la parte frontal y el ordenador de a bordo

El par estereoscópico está acoplado sobre tres servos, lo que le proporciona dos grados de libertad en rotación. Dos servos para el movimiento de cabeceo de cada una de las cámaras y un tercer servo para el movimiento panorámico de ambas cámaras. El detalle de acoplamiento entre cámara y servo puede verse en la figura 5.2.

El esquema general del sistema se muestra en la figura 5.3. El sistema se divide en dos subsistemas, uno a bordo del helicóptero y encargado del procesamiento de imágenes, control visual de las cámaras y estimación de

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

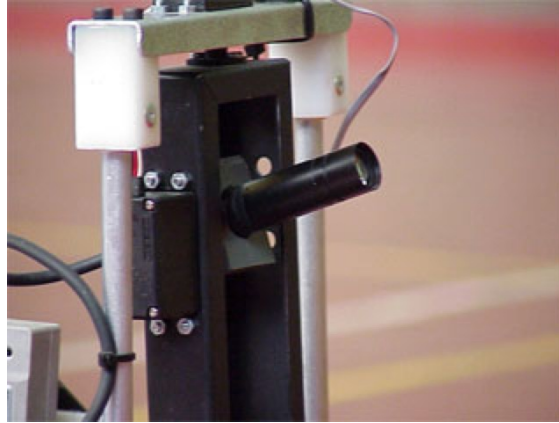


Figura 5.2: Disposición de una de las camaras del sistema estereoscópico. Vista del servo acoplado a un lateral de la cámara tipo dedo

coordenadas espaciales, y el subsistema en tierra a cargo de la supervisión del sistema a bordo, visualización y registro de datos. Ambos sistemas están comunicados mediante un enlace de red 802.11b y un radio modem. El sistema está constituido por los siguientes componentes:

Sistema a bordo:

- *PC de abordó:* PC104+ 800MHZ con linux para el procesamiento de imágenes, control visual y estimación 3D.
- *sistema servo-cámara:* camaras monocromas JAI CV-M536, acopladas a servos futaba S9450.
- *Framegrabbers:* PC104+ Imagenation PXC200L.
- *Radio Modem:* SATEL model satelline 2ASxE.
- *Tarjeta controladora de servos:* PWM basada en un microcontrolador motorola MC68HC811 con interface para puerto paralelo.

- *Video transmisor*: VTX-2500 Trango Systems Inc.

Sistema en tierra:

- *Desktop PC*: Pentium MMX 400MHZ con linux para visualización de datos e imágenes y supervisión.
- *Framegrabber*: Coreco imaging PC-COMP.
- *Radio Modem*: SATEL model satelline 2ASxE.
- *video receiver*: VRX-2500 Trango Systems Inc.

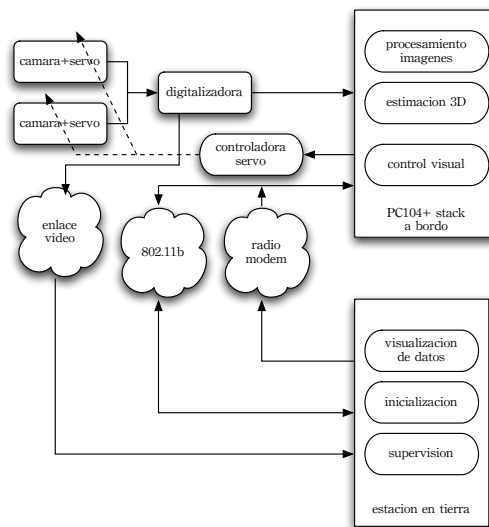


Figura 5.3: Estructura global del sistema. Sistema abordo y en tierra están desacoplados pero comunicados a través de enlaces de comunicaciones

5.2.2. Descripción general

El principio general de funcionamiento del sistema es el siguiente: Al ser detectada la línea en ambas imágenes y recobrada la posición de cada línea en cada imagen, respectivamente, esta posición es usada para generar una consigna de posicionamiento a cada servo acoplado a la cámara con la finalidad de mantener la línea en el centro geométrico de la imagen. Una vez se consigue esta condición, mediante una calibración previa es posible calcular la distancia y la altura del sistema con respecto de la línea. Como objetivo general del sistema está la detección y seguimiento de la línea en la secuencia de imágenes para así generar referencias de posicionamiento relativo del sistema (y por ende del helicóptero) con respecto de la línea. Las cámaras representadas en color amarillo en la figura 5.4 corresponden al bloque cámara-servo del esquema abajo mostrado.

Cada bloque componente, como son: estimación 3D y calibración, controlador y procesamiento serán descritos en las secciones siguientes.

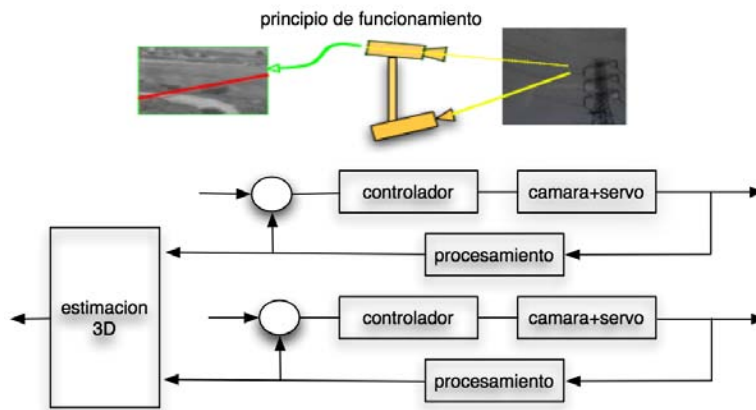


Figura 5.4: Principio general de funcionamiento del sistema estereoscópico. Se muestran los subsistemas de procesamiento, control y estimación 3D

5.2.3. Procesamiento de imágenes: Detección de la catenaria

El módulo de procesamiento de imágenes figura 5.5, tiene como función principal la detección y seguimiento de la catenaria.

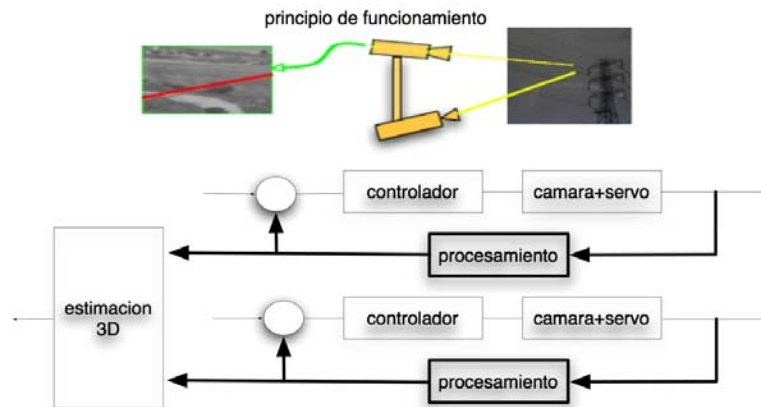


Figura 5.5: Subsistema de procesamiento de imágenes. Comprende las operaciones necesarias para la detección de la catenaria

La propiedad más sobresaliente de la catenaria (línea de alta tensión) es que la misma puede considerarse como un segmento rectilíneo dentro del campo de vista de la cámara. Este segmento o línea es detectado usando una versión de la *Transformada de Hough* [P. V. C. Hough, 1962], cuyas ideas básicas se resumen a continuación:

En un primer paso, se calcula el módulo y ángulo del gradiente de la imagen, con la finalidad de seleccionar y calcular la contribución individual de cada pixel dentro del espacio paramétrico (ρ versus θ) de la transformada. Luego son seleccionados solo aquellos pixeles que cumplen la condición de que el módulo del gradiente sea superior al 92 % y el ángulo ϕ_i sea similar

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

al ángulo de la línea detectada (la celda votante) θ_k resultado de la transformada. La contribución de cada pixel votante será inversamente proporcional a la diferencia entre el ángulo del gradiente y el ángulo de la celda, $\phi_i - \theta_k$.

La transformada de Hough es un método bastante robusto para la detección de segmentos rectilíneos en imágenes, pero posee la desventaja de ser computacionalmente costoso. Para su implementación en tiempo real es necesario valerse de variantes y/o técnicas para agilizar su cómputo. Con el propósito de acelerar y proporcionar cómputo en tiempo real dos técnicas se han usado: en primer lugar el algoritmo sólo procesa un área de la imagen, *area local de búsqueda*. Sobre la primera imagen se usa una versión de baja resolución de la transformada de Hough para detectar la línea objetivo de seguimiento, luego sobre las sucesivas imágenes se usa una versión de alta resolución sobre el área local de búsqueda. Esta área corresponde a un rectángulo en el espacio paramétrico de Hough, centrada en la celda ρ y θ donde se detectó la línea en la imagen anterior. Los límites del area local de búsqueda están dados por $\pm\Delta\rho$ y $\pm\Delta\theta$, como se muestra en la figura 5.6. En segundo lugar dentro de esta área local de búsqueda solo el 10 % de los píxeles son procesados, logrando acelerar aún más el algoritmo sin perder robustez. Esta implentación en la práctica permite alcanzar tiempos de procesamiento de 105 milisegundos por par de imágenes, aunque lejos del tiempo real permite un seguimiento on-line de la línea durante el vuelo.

5.2.4. Control servo visual de las cámaras

El objetivo del subsistema control visual, resaltado en la figura 5.7, es utilizando la información de la localización de la línea en la imagen generar las referencias adecuadas a los servos para seguir la línea con ambas cámaras, moviéndolas de manera de mantener la línea en el centro de la imagen en cada ciclo de procesamiento. Esto se logra actuando sobre los servos mediante una tarjeta controladora que genera señales PWM al servo a partir de las consignas dadas por software. La variable o señal de error a corregir es la

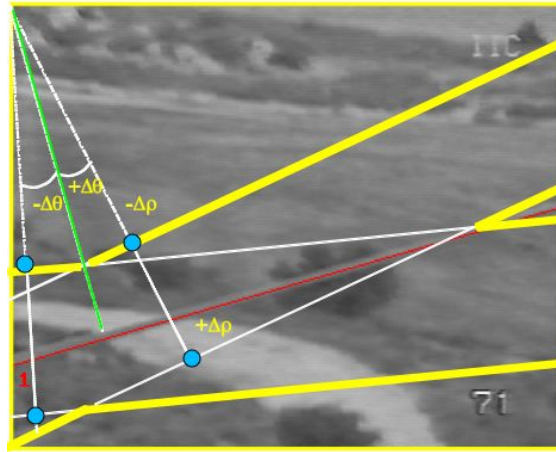


Figura 5.6: Area local de búsqueda. El área es definida por la intersección de las cuatro líneas definidas por los puntos $(+\Delta\theta, \pm\Delta\rho)$ y $(-\Delta\theta, \pm\Delta\rho)$

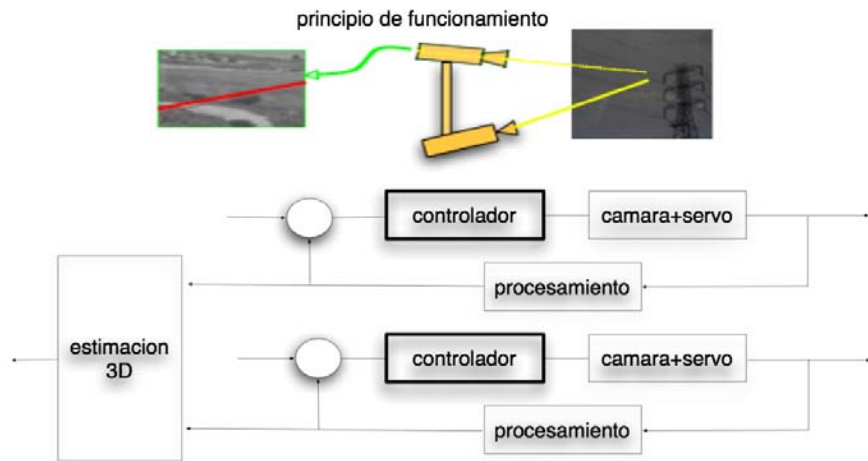


Figura 5.7: Subsistema de control visual. Comprende las operaciones y consignas para mover las cámaras y seguir visualmente la catenaria

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

distancia desde el centro de la imagen a la línea. Esta distancia es calculada en cada ciclo de procesamiento por la transformada de Hough mediante la ecuación:

$$l = \frac{h}{2} - \rho \cos \theta + \tan \theta \left(\frac{w}{2} - \rho \sin \theta \right) \quad (5.1)$$

donde:

l es la distancia desde el centro de la imagen a la línea

ρ y θ son los parámetros de la línea obtenidos de la transformada de Hough

h es la altura de la imagen en píxeles

w es el ancho de la imagen en píxeles

Siendo l la señal de error, la estructura de control usada está basada en un control directo basado en características. Directamente, la posición de la cámara será proporcional a la magnitud de esta señal multiplicada por un factor consigna/píxel. Esto expresado de otra forma es un control proporcional donde la constante proporcional es la relación consigna/píxel hallada experimentalmente de la figura 5.8. La pendiente media de esta gráfica es $m=3.7$ píxeles/consigna. El valor de la ganancia del controlador es el inverso de este valor $K = \frac{1}{m}$. Así la ecuación que genera las consignas a las cámaras es,

$$\tau_i = K \left(\frac{h}{2} - l_i \right) \quad (5.2)$$

donde:

$i = 1, 2$ para cada cámara

h es la altura de la imagen

K es la ganancia del controlador

l es la señal de error.

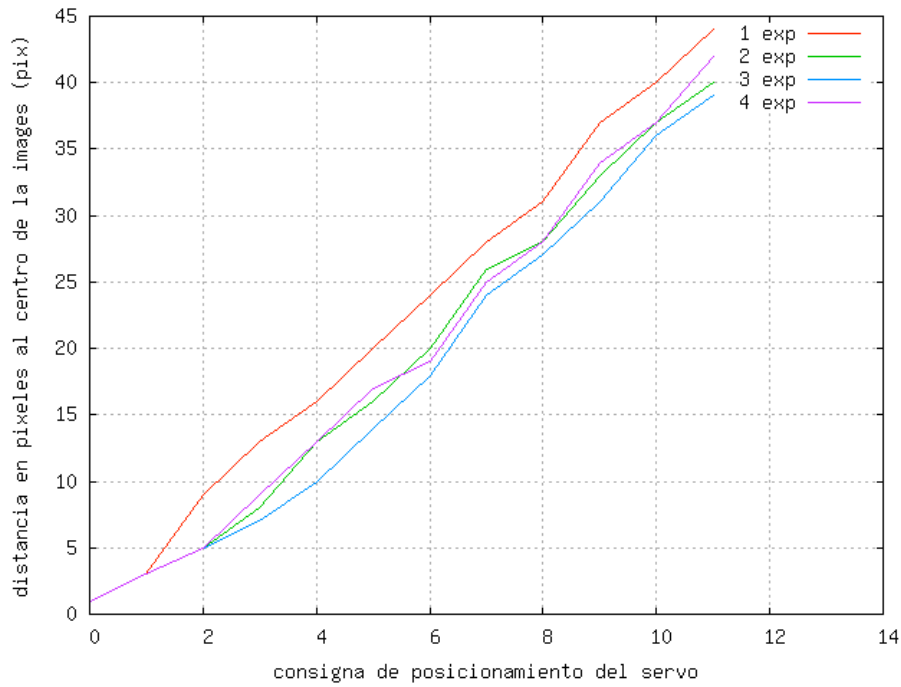


Figura 5.8: Determinación de la ganancia del controlador, consigna vs píxeles. La relación consigna-píxel es la ganancia del controlador.

Experimentalmente se ha conseguido que al no introducir ningún retraso en el lazo de control, puede adquirirse la imagen cuando la cámara está aún moviéndose, lo que se traduce en una imagen defectuosa (borrosa). Esto complica el procesamiento de la misma perdiendo robustez e incrementando el tiempo de cómputo. Dado esto, se introduce un retraso por software entre el tiempo en que la consigna al servo es dada y la imagen es leída de la digitalizadora, con el fin de garantizar que la imagen esté definida para una robusta detección de la línea.

El retraso antes mencionado en el lazo de control es dependiente de la dinámica de los servos, la robustez del algoritmo implementado y del núme-

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

ro de consignas dadas al servo en cada ciclo de procesado. Por esta razón, este retraso se ha ajustado empíricamente asegurando que el algoritmo de detección no detecte falsas líneas que puedan introducir serias incertidumbres en el cálculo de las referencias de posición durante el vuelo.

La figura 5.9 muestra los resultados de variar el tiempo de retraso. En la misma se observa la posición de la línea en la imagen cuando un escalón de 80 pixeles es introducido en ambos lazos de control, usando dos valores de retraso en el tiempo. Como se observa en la gráfica un tiempo de retraso corto origina transitorios que llevan a la detección de falsas líneas, esto se puede solventar incrementando el tiempo de retraso.

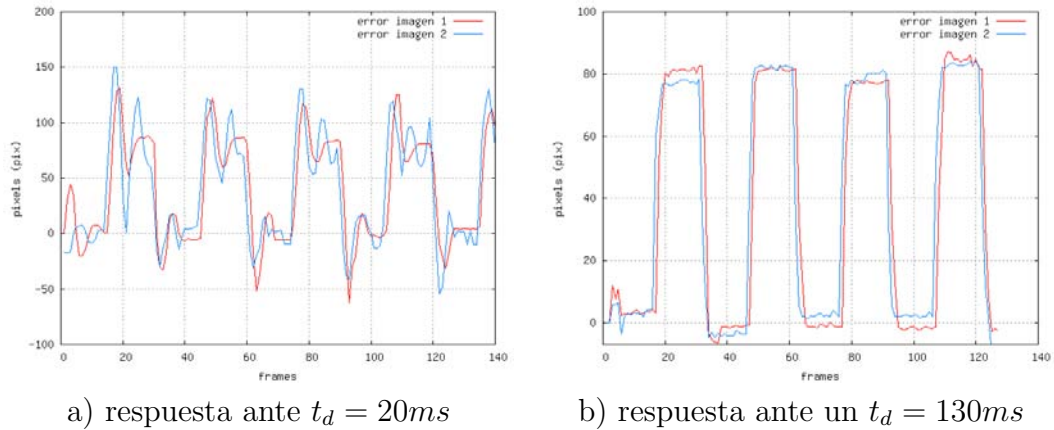


Figura 5.9: Respuesta del sistema de control ante tiempos de retraso. La figura (a) muestra la respuesta ante un escalon de 80 pixeles y un tiempo de retraso de 20 milisegundos. La figura (b) muestra la respuesta ante un escalon de 80 pixeles y un tiempo de retraso de 130 milisegundos.

En la práctica se ha considerado la siguiente estrategia. Si se envía una consigna de gran valor al servo, ésta originará un desplazamiento amplio del servo, por lo que el tiempo de espera (retraso) deberá ser grande antes de

enviar la siguiente consigna y capturar la siguiente imagen. Si por el contrario la consigna es pequeña el tiempo de espera puede reducirse a un valor bajo antes de capturar la siguiente imagen. Teniendo en consideración que las imágenes son adquiridas a razón de 25 frames por segundo, el tiempo de adquisición (T_{aq}) será 40ms. Por otra parte el tiempo de establecimiento del servo se deduce experimentalmente a partir del valor en el retraso necesario para que la imagen no presente distorsión, cuando se varia el valor en la consigna del servo. Así, a partir de valores de retraso y consigna se tiene que el tiempo de establecimiento del servo será, $T_{est} = \alpha\tau$, donde τ es el valor de la consigna dada al servo, y α es una constante de valor 0.332031125, y representa la media de la relación entre el retraso experimental y la consigna. Finalmente, la ecuación que establece el retraso total en cada ciclo de procesado viene dada por, $T_r = T_{aq} + T_{est}$ ó $T_r = 20 + 0,332031125\tau$.

5.2.5. Estimación de las coordenadas 3D

El objetivo de este módulo, figura 5.10, es calcular las coordenadas del sistema con referencia a la línea de alta tensión, es decir, la distancia **D** y la altura **H**. Estos valores pueden ser usados por el control de vuelo de un vehículo autónomo, bien sea, para seguir la línea o mantener una posición de referencia con respecto a la línea. Esta estimación de la posición se hace usando un sistema estereoscópico donde ambas cámaras siguen la línea usando el sistema de control descrito en la sección anterior.

El principio de funcionamiento se muestra en la figura 5.11. Cuando la línea esta dentro de el campo de visión de las cámaras, las cuales han sido modeladas usando el modelo pin-hole, las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para calcular la distancia **D** y la altura **H**:

$$D = \frac{A}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (5.3)$$

$$H = \frac{A}{2} + D \tan \alpha_1 \quad (5.4)$$

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

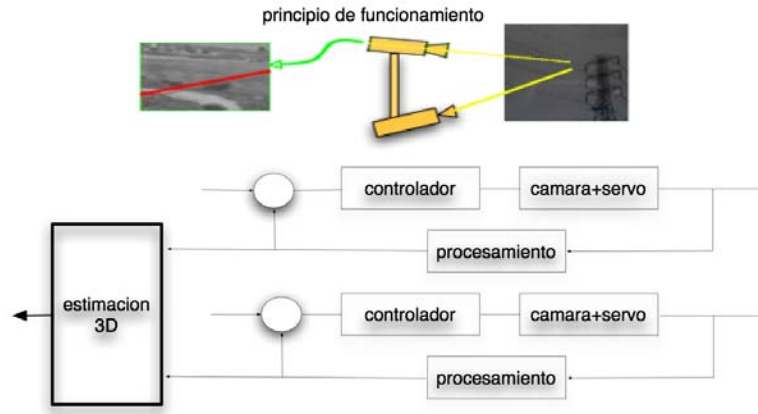


Figura 5.10: Principio general de funcionamiento del sistema estereoscópico. Se muestran los subsistema de procesamiento, control y estimación 3D

donde

A representa la distancia entre las cámaras

α_1 y α_2 representan el ángulo con el que la cámara observa la línea detectada, respectivamente.

Las variables α_1 y α_2 se obtienen en tiempo de ejecución durante el vuelo en cada ciclo, éstas son función de la consigna actual dada al servo n_1 y n_2 , de la distancia desde el centro de la imagen a la línea detectada y de la posición inicial del servo, la relación puede verse en las siguiente ecuaciones:

$$\alpha_1 = \alpha_{10} + K_1 n_1 - K_1 \frac{d_1}{K_2} \quad (5.5)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{20} + K_1 n_2 - K_1 \frac{d_2}{K_2} \quad (5.6)$$

donde

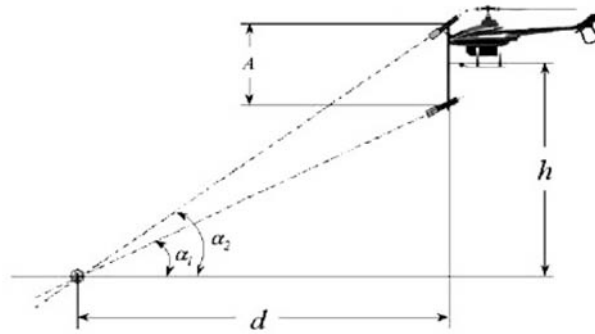


Figura 5.11: Principio de funcionamiento del sistema estereoscópico. La distancia (d) y la altura (h) del sistema se encuentran al seguir el mismo objetivo visual con ambas cámaras

n_1 y n_2 son los valores de la consigna de posición de cada servo.

d_1 y d_2 representan las distancias del centro de la imagen a cada una de las líneas detectadas, es dada por la ecuación 5.1

K_1 es la relación grados por paso del servo al dar una consigna. Parámetro del sistema que requiere ser calibrado.

K_2 representa el desplazamiento en píxeles en la imagen al dar una consigna al servo. Parámetro del sistema que requiere ser calibrado.

α_{10} y α_{20} indican los ángulos iniciales de cada servo, es decir, cuando una consigna cero es dada. Parámetro del sistema a ser calibrado.

Si los valores de α_1 y α_2 en las ecuaciones (5.5) y (5.6) son introducidos en las ecuaciones (5.3) y (5.4), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{A}{\tan(\alpha_{20} + K_1 n_2 - K_1 \frac{d_2}{K_2}) - \tan(\alpha_{10} + K_1 n_1 - K_1 \frac{d_1}{K_2})} \quad (5.7)$$

$$H = \frac{A}{2} + D \tan(\alpha_{10} + K_1 n_1 - K_1 \frac{d_1}{K_2}) \quad (5.8)$$

Estas ecuaciones permiten calcular las coordenadas D y H del sistema estéreo (y por ende del vehículo) con respecto a la línea detectada. Estas ecuaciones son función de cuatro variables n_1 , n_2 , d_1 y d_2 dadas por el sistema de control visual descrito en la sección 5.2.4 y en función de cinco parámetros del sistema estéreo A , K_1 , K_2 , α_{10} , α_{20} que requieren ser calibrados usando el procedimiento descrito en la sección siguiente.

5.2.6. Calibración del sistema estereoscópico para el cálculo de las coordenadas 3D

El modelo pin-hole usado con las cámaras, y sobre el cual se basan la ecuaciones 5.7 y 5.8, no resulta adecuado cuando bien sea, se requiere precisión en la resolución o se usa un área de trabajo muy amplia para el sistema estéreo. Tradicionalmente, se usan modelos más complejos que introducen más parámetros del sistema como distorsión óptica, tamaño del pixel, centro óptico, centro de la imagen, etc, que necesitarán ser calibrados permitiendo grados de libertad suficientes para extrapolar los datos de calibración y así mejorar la precisión. Pero al introducir más parámetros, los cuales generalmente deben ser calibrados, se introducen más errores principalmente debidos a la calibración.

Como alternativa al error en los parámetros del modelo en el presente desarrollo, el área de trabajo se divide en sectores con un conjunto de parámetros propios del modelo pin-hole para cada sector, donde estos parámetros varían de un sector a otro. El tamaño de cada sector y el conjunto de parámetros asociado se obtienen durante la calibración optimizando la precisión en D y H en términos del error cuadrático medio (ECM). Estos valores son

calculados usando los datos de calibración mediante las siguientes ecuaciones:

$$ECM_j(D) = \sum_{i=1}^{m_j} \left(D_i - \frac{A_j}{\tan(\alpha_{20j} + K_{1j}(n_{2i} - \frac{d_{2i}}{K_{2j}})) - \tan(\alpha_{10j} + K_{1j}(n_{1i} - \frac{d_{1i}}{K_{2j}}))} \right) \quad (5.9)$$

$$ECM_j(H) = \sum_{i=1}^{m_j} \left(H_i - \frac{A_j}{2} + D_i \tan(\alpha_{10j} + K_{1j}(n_{1i} - \frac{d_{1i}}{K_{2j}})) \right) \quad (5.10)$$

donde

$ECM_j(D)$ es el ECM en la distancia D en el sector j

$ECM_j(H)$ es el ECM en la altura H en el sector j

m_j es el número de puntos o muestras en el sector j cuyos datos son conocidos y empleados en la calibración

D_i y H_i son la distancia y la altura del sistema con respecto a la línea para cada división i en el sector j

n_{1i} , n_{2i} , d_{1i} , d_{2i} son la consigna dada a cada servo y la distancia desde la línea al centro de la imagen respectivamente, para cada división i en el sector j

A_j , α_{10j} , α_{20j} , K_{1j} y K_{2j} son los valores actuales de estos parámetros en el sector j

Para cada sector j dos conjuntos de parámetros (A_j , α_{10j} , α_{20j} , K_{1j} y K_{2j}) son calculados tal que minimizan el ECM de las ecuaciones 5.9 y 5.10 usando un algoritmo de minimización llamado Levenberg-Marquardt [Levenberg, 1944] y [Marquart, 1963]. En la práctica ambos ECM tienen evoluciones similares (aunque $ECM_j(D)$ es siempre mayor que $ECM_j(H)$),

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

por lo que sólo $ECM_j(H)$ es necesario tener en cuenta en la calibración.

En el caso en que el área de trabajo sea dividida en pocos sectores, el conjunto de parámetros asociado a cada sector es válido y puede ser usado para un área o sector de mayor tamaño, pero tiene la desventaja de que el ECM es muy alto dado la poca robustez del modelo pin-hole. Por el contrario, si el número de sectores es grande el conjunto de parámetros asociado a cada sector difieren mucho unos de otros. Acorde con este razonamiento se elige un número intermedio de sectores que permita una adecuada generalización de resultados para otros valores diferentes a los datos de calibración. Los criterios sobre los cuales se basa la escogencia del número de sectores adecuado es la siguiente: Dividiendo el espacio de trabajo en diferentes sectores se mide el error cuadrático medio en la distancia y la altura, la evolución en el error será el parámetro principal que defina el No de sectores. El siguiente cuadro 5.1 muestra la evolución.

No de sectores	$ECM(d)$	$ECM(h)$
1	0.418	0.0687
2	0.4152	0.0607
5	0.27	0.046
7	0.254	0.047
12	4.3925	0.53

Cuadro 5.1: Valores de ECM (error cuadrático medio) en altura (H) y distancia (D) para diferentes sectores

Se dedujo de las pruebas realizadas que los errores disminuían al aumentar el número de sectores, pero a partir de un cierto número de sectores los errores aumentaban, siendo el valor adecuado entre 5 y 7. La razón de este aumento es la sobre-calibración, ya que si crece el número de sectores tendiendo a igualar el número de puntos en cada sector, equivale a memorizar la distancia y altura para cada punto en el espacio de trabajo.

5.2.7. Resultados del cálculo de las coordenadas 3D en vuelo real usando un helicóptero a escala

Este apartado muestra los resultados obtenidos durante varias pruebas de vuelo. En nuestros experimentos se usó un helicóptero de aeromodelismo, el cual fue pilotado manualmente siguiendo varias trayectorias de vuelo mientras el sistema de visión realizaba la detección y seguimiento de la línea. El escenario y la línea que fue colocada a una altura de 2 metros con respecto al suelo, se muestran en la figura 5.12. Aunque los experimentos fueron realizados en un ambiente relativamente controlado ya que las condiciones lumínicas fueron constantes, el fin perseguido con estos experimentos fue la validación del sistema en general. Una vez se comprobó la validez de la propuesta en cuanto a seguimiento y estimación de coordenadas, el paso siguiente consiste en comprobar la detección de la línea en diferentes condiciones ambientales.

El sistema, para este experimento, fue calibrado para un rango de trabajo de $0 \leq H \leq 2m$ y $3,5m \leq D \leq 12m$. Para cada posición D_i y H_i , los valores de las variables n_{1i} , n_{2i} , d_{1i} y d_{2i} de ambas cámaras son almacenados en un archivo mientras el algoritmo sigue la línea. Con estos datos y las ecuaciones mostradas en la sección 5.2.6, se aplica el procedimiento de minimización del error cuadrático medio hasta un valor definido por el usuario. Para un análisis en detalle del procedimiento de calibración, así como de los criterios para la definición del error máximo en cada cuadrante, referase a [Garcia, 2004].

La figura 5.13 muestra la señal de error generada en el plano de la imagen (en cada imagen, respectivamente) para el control visual durante el segundo vuelo. En las ordenadas se tiene el número de frames durante el cual la línea fue seguida y en las abscisas la distancia en píxeles desde el centro de la imagen a la línea. Esta señal ha sido generada realizando la siguiente prueba: el helicóptero estuvo inicialmente sobre tierra, el algoritmo de visión se ejecutó y a continuación el helicóptero realiza un despegue para

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

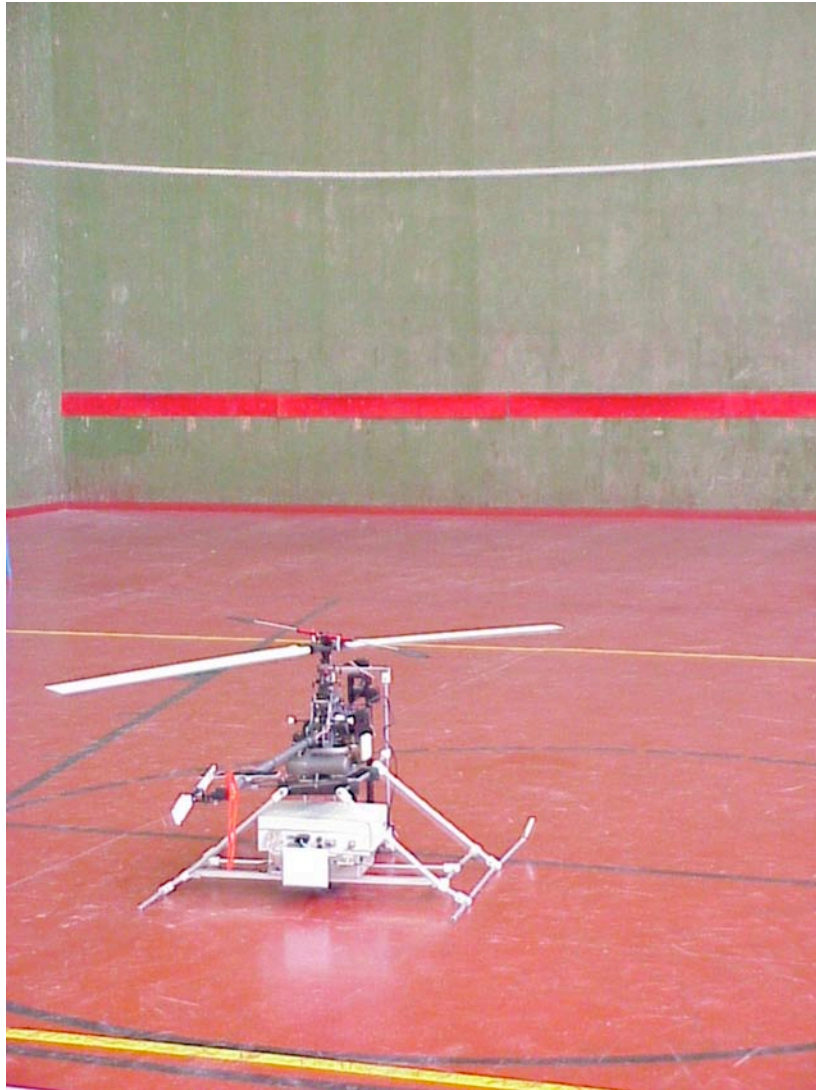


Figura 5.12: Escenario de pruebas donde fueron realizados los experimentos. Se muestra la plataforma de vuelo y la línea en segundo plano sobre un fondo.

seguir una trayectoria vertical y luego aterrizar. Durante este vuelo la línea fue continuamente seguida. Se puede observar de la figura que los valores de la señal fueron cercanos a cero cuando la línea era seguida (centrada) en la imagen antes del despegue y después del aterrizaje, valores iniciales y finales en la gráfica, respectivamente. Los valores intermedios corresponden a los valores obtenidos durante el vuelo. Se puede ver como las vibraciones afectan las señales en el plano de la imagen. De esto se deduce la necesidad de un sistema servo cámara aislado de vibraciones, para así evitar cualquier incertidumbre que pueda afectar el cálculo de las coordenadas 3D del sistema. Un comportamiento similar al mostrado se observó durante las dos pruebas restantes.

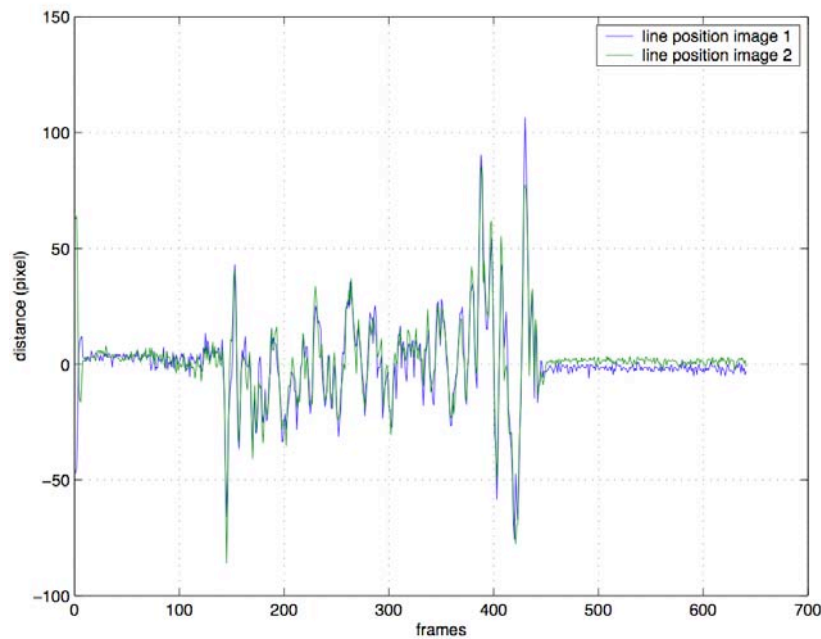


Figura 5.13: Señal de error en el plano de la imagen durante la segunda prueba experimental

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

La figura 5.15 muestra la distancia y la altura estimadas por el sistema estéreo durante el segundo experimento. En la gráfica el eje de las abcisas muestra la distancia y altura en metros con respecto a la línea y las ordenadas el número de frames durante los cuales se sigue la línea. En el gráfico de la altura se puede observar la posición del helicóptero primero a 2 metros por debajo de la línea. La altura disminuye y tiende a cero a medida que el helicóptero aumenta su altitud para finalmente regresar a la posición inicial (aterrizaje). El gráfico de la distancia muestra una diferencia de 2 metros entre la posición inicial y final lo cual es esperado ya que el helicóptero se desplazo hacia adelante mientras ascendía.

El rendimiento del sistema de procesamiento de imágenes se evaluó en términos del tiempo de ciclo. En versiones anteriores el tiempo de ciclo alcanzaba los 380 milisegundos por par de imágenes, después de aplicar estrategias como área local de búsqueda y procesado, umbralizado automático basado en el histograma, restricción el número de pixeles procesados y escogencia aleatoria de los pixeles para la transformada de hough el tiempo de ciclo se redujo a 105 milisegundos por par de imágenes, aunque lejos del tiempo real el desempeño fue aceptable permitiendo seguir la línea durante el vuelo.

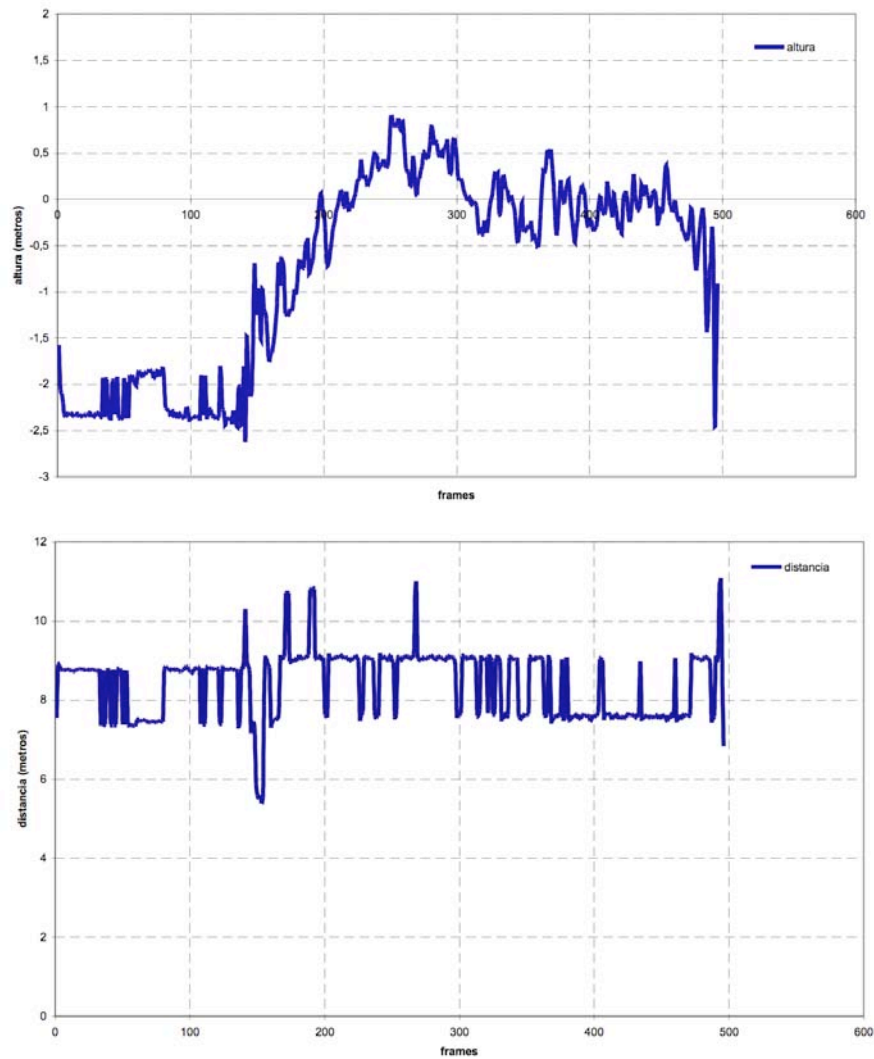


Figura 5.14: Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Datos mostrados corresponden al primer vuelo experimental

5.2. Visión por computador en UAV para la inspección en instalaciones eléctricas

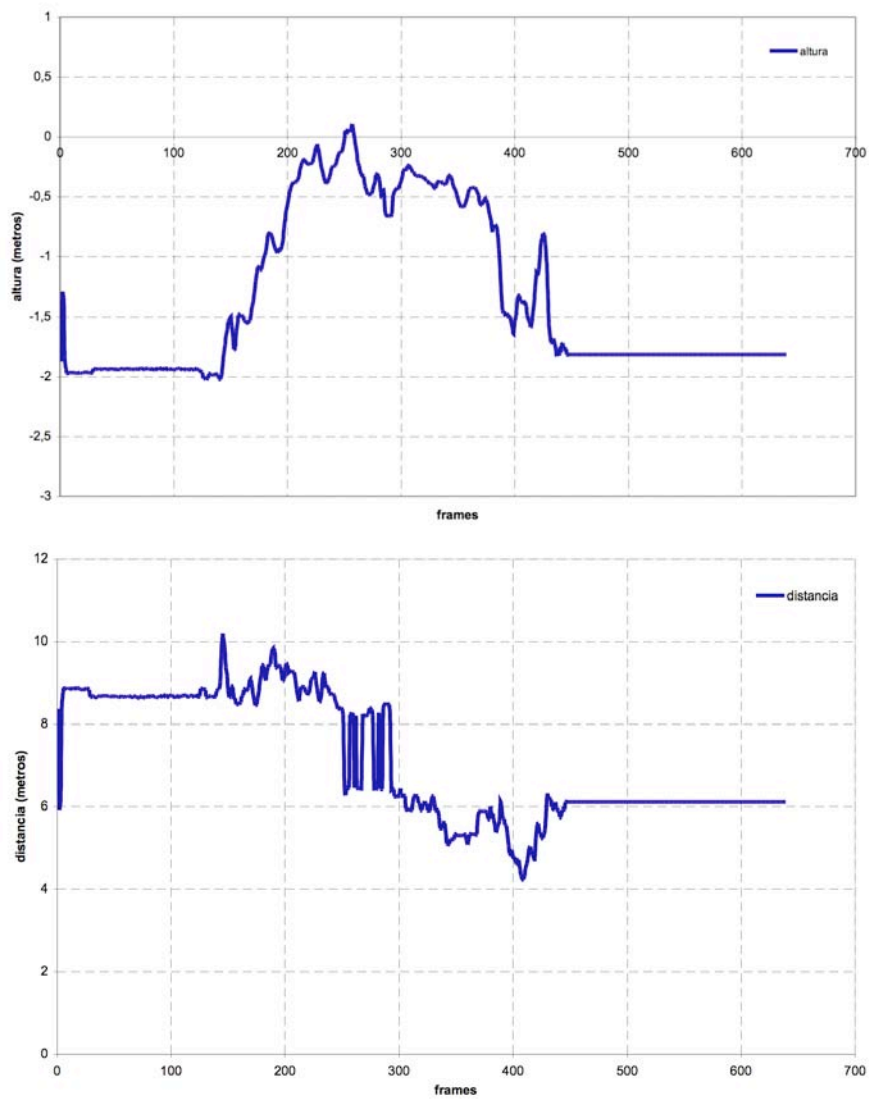


Figura 5.15: Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Datos obtenidos durante el segundo vuelo experimental

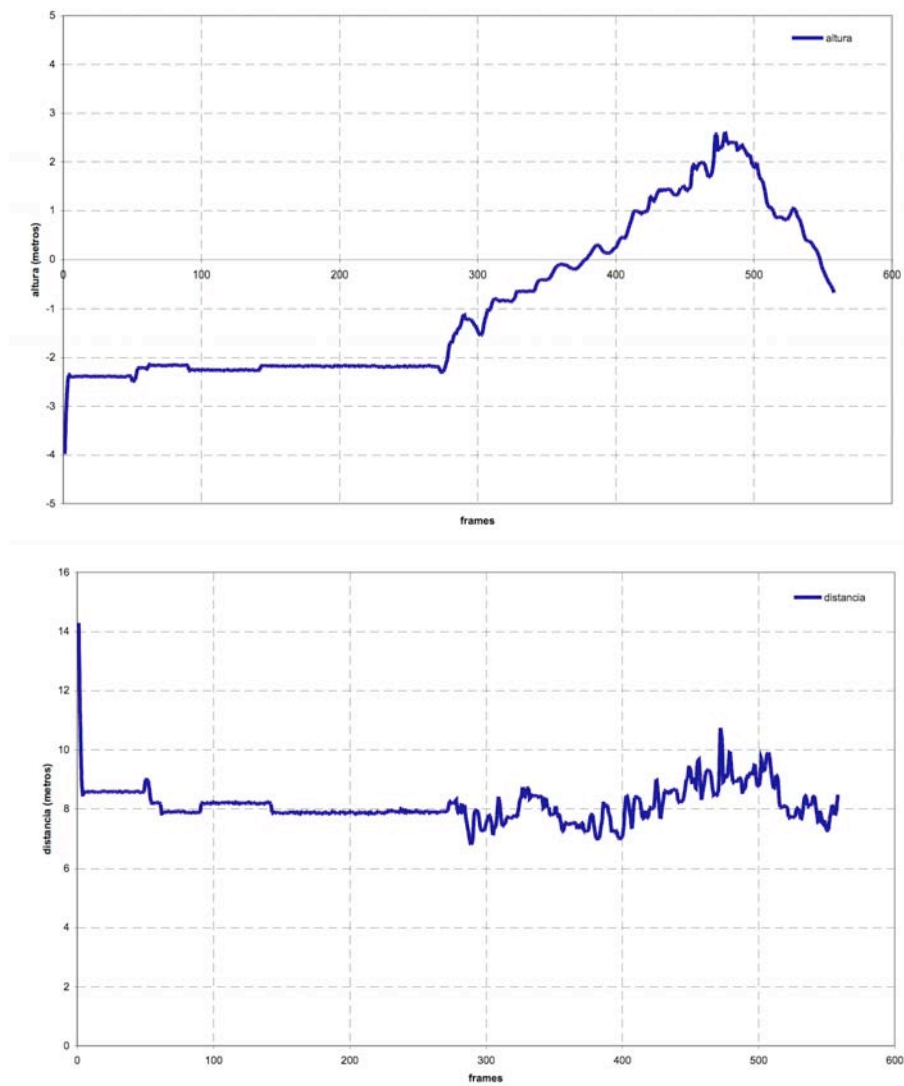


Figura 5.16: Altura y distancia del helicóptero con respecto a la línea durante el vuelo. Valores experimentales correspondientes al tercer vuelo experimental

5.2.8. Discusión

El comportamiento observado durante las pruebas muestra un desempeño similar en todas. Las gráficas 5.14 y 5.16 recogen los resultados durante dos pruebas subsiguientes, observándose una evolución similar en ambas, y mostrando repetitividad del algoritmo en el calculo de las magnitudes.

La estimación de la distancia y la altura pueden ser usados como referencias de posición siendo integradas con el control de vuelo a través de comandos de posición directamente, por medio los mensajes adecuados como se mostró en el capítulo 4. A través de la estimación de la distancia y la altura relativa a la línea es posible mantener una determinada posición del vehículo con respecto a línea. De entre las multiples ventajas que proporciona el tener una estimación 3D relativa al objeto de seguimiento, esta el hecho de que pueda ser usada como mecanismo de seguridad para mantener una posición de seguridad durante una tarea de inspección.

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

Los sistemas descritos a continuación están dirigidos a asistir la navegación autónoma de un helicóptero a escala mediante visión por computador. Los siguientes trabajos detectan y siguen visualmente objetos en entornos urbanos. Como objetivo inicial se plantea la posibilidad de modificar dinámicamente la trayectoria de vuelo de un helicóptero autónomo, cuyo sensor principal para la navegación autónoma es el GPS (sistema de posicionamiento global), usando visión por computador. El helicóptero estará dirigido a tareas de inspección y monitoreo en entornos urbanos, p.e, entre edificios cuyas características más resaltantes pueden ser las ventanas o puertas. La trayectoria de vuelo esta inicialmente definida por coordenadas GPS, a continuación a través de una interfaz gráfica desde tierra es posible escoger sobre la imagen el objetivo que se desea seguir, luego a medida que se va siguiendo el objetivo a lo largo de las imágenes se van enviando consignas de error en el plano de la imagen al control de vuelo de manera de comandar la velocidad y alinear el helicóptero con el objeto de seguimiento.

5.3.1. Detección y seguimiento de características para el control de velocidad lateral

El sistema a continuación hace uso y sirve de validación a la propuesta hecha en el capítulo 3, sección 3.4 sobre el control servo-visual lateral. Este sistema tiene como finalidad demostrar el control de velocidad lateral de un helicóptero basado en la posición de las características en la imagen. Este sistema fue desarrollado y probado experimentalmente en la Universidad del Sur de California¹.

La estructura general del algoritmo contempla dos subsistemas, un ser-

¹Robotics Embedded System Laboratory at University of Southern California

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

vidor y un cliente comunicados por mensajes TCP/IP sobre sistema operativo Linux. El servidor (embebido) se ejecuta a bordo del helicóptero y es la parte principal para la detección y seguimiento de las características. Este se encarga del procesamiento de las imágenes apoyándose en el uso de librerías OpenCV [OpenCV, 2001] para las operaciones básicas. El cliente, una interfaz gráfica que se ejecuta en un ordenador en tierra se encarga del registro, visualización de datos y control del comportamiento del algoritmo a bordo. El procesamiento de imágenes comprende las siguientes operaciones, segmentación en color, detección de rectángulos, correlación normalizada y filtro de kalman. El cliente ha sido construido usando librerías gráficas GTK y ambos subsistemas usan librerías de compresión de imágenes, ya que las mismas se transmiten por TCP/IP via 802.11b.

El hardware básico usando para acometer esta tarea comprende un ordenador PC104 a 800MHZ, una tarjeta digitalizadora PX200 y una cámara VGA miniatura a color. Adicionalmente, se contó con módulos de integración para tarjeta de red PCMCIA. Una descripción en detalle se muestra en [Mejias et al., 2005].

5.3.1.1. Procesado de imágenes para la detección de características

Varias operaciones de procesamiento de imágenes son realizadas para poder extraer la información necesaria y generar las consignas de error. Las mismas se resumen en:

- *Segmentación y umbralizado*, el propósito de esta etapa es básicamente extraer el color que caracteriza el objeto de interés dividiendo la imagen en dos regiones, la imagen segmentada es entonces convertida a niveles de gris, y es en esta imagen donde se captura el patrón para la sucesiva detección interframe. La ecuación usada para convertir la imagen a niveles de gris es:

$$Y = 0,21267 * R + 0,715160 * G + 0,072169 * B \quad (5.11)$$

La imagen es primero descompuesta en sus componentes rojo, verde y azul, luego asumiendo que el color del objeto de interés ha sido modelado, la ecuación 5.11 es resuelta para encontrar el valor de Y , que es la proyección del color en niveles de gris, así con este valor se umbraliza la imagen basándose en el color. Existen dos niveles o umbrales, uno bajo y otro alto centrados en el valor del color del objeto, los valores de dichos niveles serán dependientes del color del objeto de interés². Esta estrategia evalúa los tres canales de la imagen al mismo tiempo usando sólo un valor para el umbral. La formulación es la siguiente:

Sea I la imagen con componentes I_r, I_g, I_b , respectivamente el algoritmo de segmentación se define como

Algorithm 5.3.1: SEGMENTACION()

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \leftarrow N1 \text{ to } N2 \\ Y_i = 0,21267 * I(i)_r + 0,715160 * I(i)_g + 0,072169 * I(i)_b \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{if } Y_{low} < Y_i < Y_{up} \\ I_i = C_f \\ \text{else} \\ I_i = C_b \end{array} \right. \end{array} \right.$$

donde :

$N1$ y $N2$ son los limites del area local de busqueda

C_f y C_b los valores para foreground y background

Y_{low} y Y_{up} son los niveles bajo/alto del umbral ,

por lo general, $Y_{low} = 0,7 * Y_c$ y $Y_{up} = Y_c$

Y_c es la proyeccion a niveles de gris del color objetivo usando (5,11)

A continuación la imagen segmentada se umbraliza para generar la version binaria de la misma donde el objeto de interés se representa con 1's y el fondo con 0's.

²el algunos casos los niveles alto/bajo del umbral podrán ser 255 or 0, respectivamente, en tales casos un solo umbral es usado

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

- *Detección de rectángulos*, esta dirigida a identificar aquellas figuras geométricas candidatas a ventanas. Esta etapa recibe como entrada la imagen binaria, encuentra los contornos en ella y aproxima los mismos usando el algoritmo Douglas-Peucker [Douglas and Peucker, 1973], un rectángulo es extraído verificando la convexidad y el ángulo entre los vectores que componen el contorno aproximado.
- *Template Matching*, la etapa de matching es una de las partes esenciales del algoritmo de seguimiento. La misma se realiza grabando un parche o patrón de 40x40 píxeles centrado alrededor de la posición del objeto de interés seleccionado. Luego ese patrón es sucesivamente comparado con un área local de 100x100 píxeles en la imagen de escala de grises. El área local esta localizada en principio en la misma posición del patrón, a partir de allí la posición es actualizada en la posición donde fue detectada en el frame anterior. Este proceso se realiza midiendo la similitud entre el patrón y el área local de búsqueda a lo largo de la secuencia de imágenes, esta medida de similitud se convierte luego a coordenadas de posición dentro de la imagen.

La técnica usada en este proceso se basa en la *correlación normalizada*, y se define

$$\zeta = \frac{\sum_{\hat{x}}^{w-1} \sum_{\hat{y}}^{h-1} T(\hat{x}, \hat{y}) I(x + \hat{x}, y + \hat{y})}{\sqrt{\sum_{\hat{x}}^{w-1} \sum_{\hat{y}}^{h-1} T^2(\hat{x}, \hat{y}) \sum_{\hat{x}}^{w-1} \sum_{\hat{y}}^{h-1} I^2(x + \hat{x}, y + \hat{y})}} \quad (5.12)$$

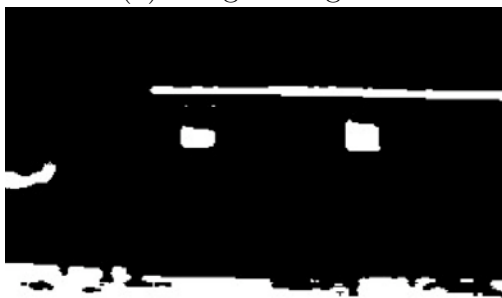
Donde w y h son el ancho y alto de la ventana de correlación. T es el patrón e I la imagen. La secuencia de operaciones puede verse en la figura 5.17.



(a) Imágen Original



(b) Imágen Segmentada



(c) Imágen umbralizada



(d) Imágen con contornos detectados

Figura 5.17: Secuencia de operaciones de preprocesamiento de la imagen

5.3.1.2. Estimación usando Filtro de kalman

La etapa de estimación usando el filtro de kalman [Kalman, 1960] es usada para estimar la posición y seguir el objeto de interés a lo largo de la secuencia de imágenes. La entrada del filtro son la coordenadas i y j en pixeles dadas por la etapa de matching, y la salida es una estimación de esa posición en la imagen actual. El problema de seguimiento puede ser aproximado como un sistema lineal, y puede ser descrito usando las siguientes ecuaciones:

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + w_k \quad (5.13)$$

donde w_k es el ruido aleatorio asociado al proceso. El subíndice k representa tiempo. X_k es el vector de estado que describe el movimiento del objeto (su posición p , velocidad v y aceleración a) y u_k es la entrada del sistema. El vector de medida en el tiempo k es dado por

$$Z_k = H_k X_k + \nu_k \quad (5.14)$$

donde H_k es conocida y ν_k es el ruido aleatorio asociado a la medida. El filtro de kalman resultante se formula como sigue: Supongamos que w_k es ruido blanco y gaussiano con matriz de covarianza Q , al igual que ν_k con matriz de covarianza R . Ambos valores no están correlados. En general la dinámica tiene la forma $\hat{X}_k = \phi_{k-1} \hat{X}_{k-1} + w_k$ expandiendo la ecuación se tiene

$$\begin{bmatrix} p_k \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{k-1} \\ v_{k-1} \\ a_{k-1} \end{bmatrix} + w_k$$

donde a_{k-1} es la aceleración de la característica, v_{k-1} es la velocidad y p_{k-1} su posición. T es el tiempo entre las muestras k y $k-1$. Para la tarea considerada, estamos interesados en estimar la posición de la característica en

la imagen. Suponiendo el caso en que las características poseen aceleración constante (modelo de aceleración constante), el vector de medida se reduce a $Z_k = [i \ j]^T$. La ecuaciones de actualización y propagación del estado viene dadas por

$$\hat{X}_k(-) = \Phi_{k-1} \hat{X}_{k-1}(-) \quad (5.15)$$

$$P_k(-) = \Phi_{k-1} P_{k-1}(+) \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (5.16)$$

$$S_k = H_k P_k(-) H_k^T + R \quad (5.17)$$

$$K_k = P_k(-) H_k^T S_k^{-1} \quad (5.18)$$

$$P_k(+) = (I_n - K_k H_k) P_k(-) \quad (5.19)$$

$$\hat{X}_k(+) = \hat{X}_k(-) + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_k(-)) \quad (5.20)$$

En las ecuaciones 5.15 a 5.20, el superíndice T indica la transpuesta de la matriz. Φ es la matriz de transición. S es la covarianza en la medida, K es la matriz de ganancia, y P es la covarianza del error en la predicción. La ecuación 5.15 es la extrapolación en la estimación del estado. La ecuación 5.16 es la extrapolación en la covarianza del estado. La ecuación 5.18 es la matriz de ganancia del filtro. Las ecuaciones 5.19 y 5.20 son la actualización de la covarianza y la estimación del estado, respectivamente. Se hace distinción entre la estimación hecha antes y después de la medida. $\hat{X}_k(-)$ es la estimación del estado que resulta solo de la propagación del estado (antes de la medida) y $\hat{X}_k(+)$ es la estimación corregida del estado, después de la medida. $P_k(-)$ y $P_k(+)$ se definen de forma similar.

Un factor importante a tener en cuenta para el funcionamiento del filtro de Kalman es el ajuste de la matrices de covarianza Q y R . Estas matrices representan respectivamente, las covarianzas de los ruidos que modelan el comportamiento del sistema y del sensor. El proceso de ajuste suele ser complejo por el hecho de la dificultad en la medición del sistema real para poder compararlo con las estimaciones que proporcionan el modelo del sistema y del sensor. Estas matrices fijan el comportamiento del filtro, ya

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

que en función del error que se modele con cada una de las matrices, el filtro dará más peso al dato que da el modelo (predicción) en el caso Q , o al dato que da el modelo del sensor (medida) en el caso de R . Cuanto mayor sean los valores de estas matrices, menor influencia tendrán en el proceso de filtrado los valores calculados por el modelo correspondiente. Para esta tarea los elementos de las matrices Q y R se han determinado experimentalmente para conseguir la respuesta del filtro más adecuada al problema de estimación de posición. En el presente trabajo se opta por dar mayor peso a las medidas por lo que los elementos de la diagonal de la matriz Q se definen iguales a 10^{-5} y los de la matriz R iguales a 10^{-1} .



Figura 5.18: Detección y seguimiento de la ventana. El círculo pequeño corresponde a la característica escogida y el círculo grande a la estimación del filtro de kalman

La salida del filtro de kalman ($\hat{X}_k(+)$) se usa como señal de error e que generará las referencias para el control de velocidad lateral del helicóptero. La generación de las referencias visuales a partir de la posición de la

característica en la imagen viene dada por la ecuación 3.22. La figura 5.18 tomada durante una prueba experimental resume el proceso de detección y estimación. El círculo pequeño (color azul) representa la característica elegida por el usuario, el círculo grande (color rojo) representa la salida del filtro de kalman. La componente horizontal de esta señal, última mencionada, es usada como referencia para el control de vuelo.

5.3.1.3. Arquitectura de control del vehículo AVATAR

El vehículo AVATAR posee un sistema de control de vuelo sobre una arquitectura jerárquica basada en comportamiento. Resumiendo, un controlador basado en comportamiento [Mataric, 1997] divide la tarea de control en un conjunto de subtareas (módulos, en adelante) apenas acoplados entre si. Cada módulo actúa en paralelo y es responsable de una tarea en particular, y en conjunto actúan para resolver un problema global. Módulos de bajo nivel son responsables de funciones básicas del robot, funciones que requieren una respuesta en tiempo real, mientras que los de alto nivel se encargan de funciones que no requieran una respuesta crítica en el tiempo, como por ejemplo navegación, planificación o localización de objetos. La arquitectura de control de vuelo usada por el vehículo AVATAR se muestra en la figura 5.19. Una explicación más detallada sobre los diferentes módulos de bajo nivel se describen en [Montgomery, 1999],[Montgomery, 2000], a continuación se resume la tarea específica del control de velocidad lateral.

A bajo nivel el robot posee un conjunto de módulos reflexivos (respuesta en tiempo real) que mantienen la estabilidad en vuelo estacionario. El módulo *control de orientación* intenta mantener el ángulo de orientación deseado usando los datos de la unidad de medida inercial (IMU) actuando sobre el rotor de cola. El módulo *control de altitud* usa el sonar, GPS y IMU para el control del colectivo rotor principal. El módulo *control de pitch y roll* mantiene los ángulos pitch y roll deseados, la lectura de los ángulos deseados proviene del módulo *velocidad lateral*. El módulo *velocidad lateral*

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

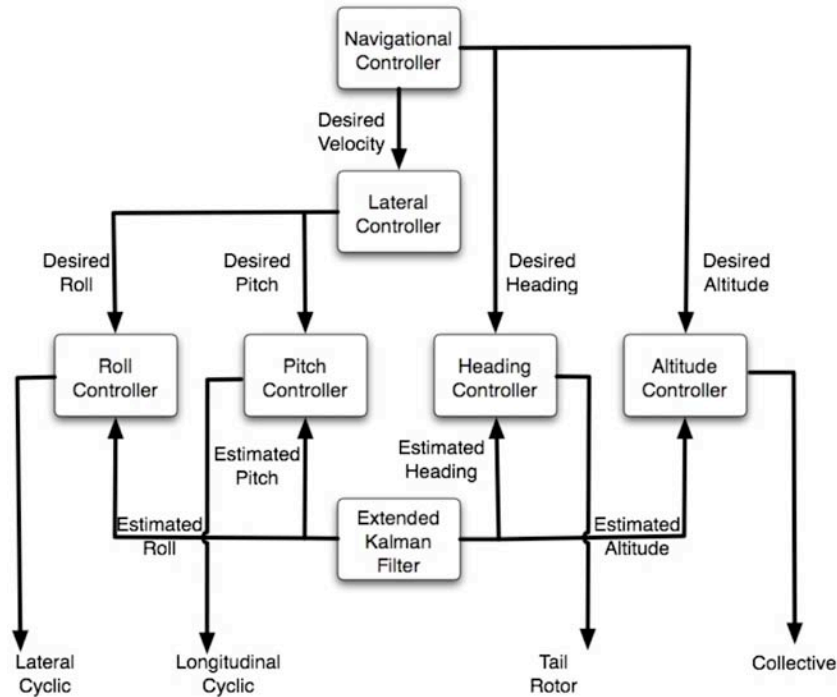


Figura 5.19: AVATAR arquitectura de control. Se muestran diferentes módulos encargados de diferentes tareas. Jerarquía descendente donde los módulos de alto nivel están en la cima de la figura.

genera las consignas deseadas para los ángulos pitch y roll, que a su vez son dadas a los módulos *control pitch* y *roll* para alcanzar la velocidad lateral deseada. A un nivel más alto el módulo *control de navegación* genera consignas de orientación para *control de orientación*, consignas de altitud o velocidad vertical para el *control de altitud* y consignas de velocidad lateral para el *control de velocidad lateral*. La ventaja de este esquema de control está en la habilidad de contruir comportamientos más complejos sobre los módulos de bajo nivel existentes sin necesidad de cambiarlos.

Los módulos de bajo nivel y de respuesta en tiempo real *roll*, *pitch*, *cabeceo*, *altitud* y *control lateral* son implementados con controladores proporcionales (El *control de altitud* es implementado con un controlador proporcional-integral (PI)). Por ejemplo el *control de roll* lee el valor actual del ángulo roll de la IMU y entrega consignas laterales cíclicas al helicóptero. Como se muestra en la ecuación 5.21, τ es la consigna para el servo, θ es el ángulo roll y θ_d el valor de ángulo roll deseado.

$$\tau = K_p(\theta_d - \theta) \quad (5.21)$$

El módulo de *control de navegación* es responsable de la planificación y ejecución de los diferentes módulos. Si el error en el ángulo de orientación es pequeño, el *control de navegación* entrega la velocidad lateral deseada al control de *velocidad lateral*. Si el error en el ángulo de orientación es grande, el *control de orientación* alinea el helicóptero al ángulo deseado mientras mantiene cero velocidad lateral.

El *control lateral* es dividido en dos partes, *control de vuelo estacionario* (*hover*) y *control de velocidad*. El *control de vuelo estacionario* se activa, bien sea cuando el helicóptero vuela hacia un punto destino o vuela sobre un objetivo específico. Este módulo es usado en el momento cuando el helicóptero debe moverse lateralmente hacia un punto (de coordenadas GPS) deseado. Este control es implementado con un controlador proporcional. El control lee la coordenada GPS deseada y actual, y calcula las consignas para el helicóptero como se muestra en la ecuación 5.22, donde τ es la consigna o referencia enviada al controlador siguiente, $g(\theta_{lat}, \theta_{lon})$ es función de la latitud y longitud actual y $g(\theta_{dlat}, \theta_{dlon})$ es función de la latitud y longitud deseadas, K_p es la ganancia proporcional. La función g convierte la latitud y longitud dadas, a la correspondiente distancia en metros entre las coordenadas.

$$\tau = K_p(g(\theta_{dlat}, \theta_{dlon}) - g(\theta_{lat}, \theta_{lon})) \quad (5.22)$$

Una vez las características u objetos han sido detectados, el *control de velocidad* se super impone sobre *control de vuelo estacionario*, así el helicóptero

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

comienza a moverse hacia el objeto. Este control ha sido implementado como un controlador PI. El término integral es usado para reducir el error en estado estacionario. El *control de velocidad* se muestra en la ecuación 5.23 donde τ es la consigna lateral enviada al controlador siguiente, v es la velocidad actual y v_d es la velocidad deseada, K_p es la ganancia proporcional y K_i es la ganancia integral.

$$\tau = K_p(v_d - v) + K_i \int (v_d - v) dt \quad (5.23)$$

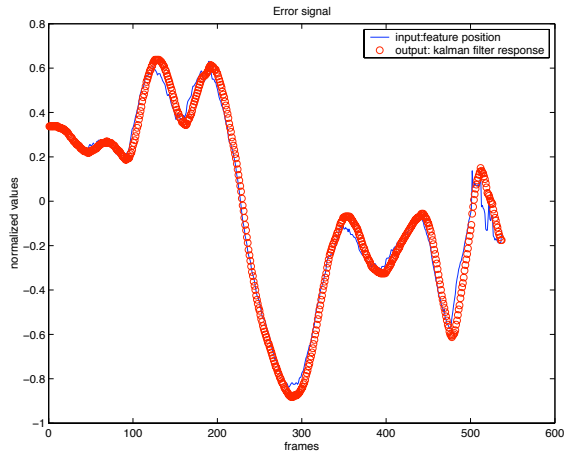
Para la tarea de control visual considerada en este desarrollo, la velocidad deseada corresponde con las referencias de velocidad enviadas desde el algoritmo de visión.

5.3.1.4. Resultados

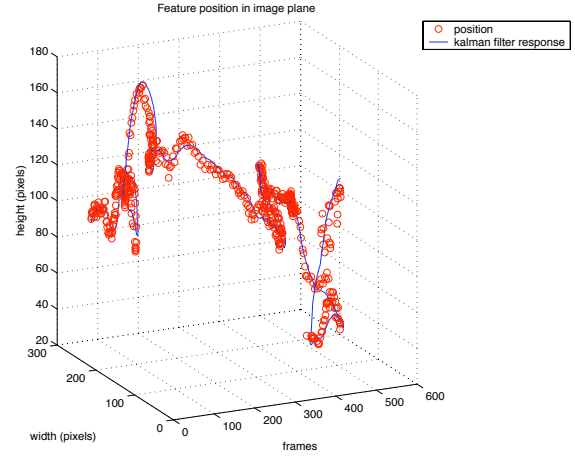
Este apartado recoge los resultados del sistema desarrollado. Varios vuelos fueron llevados a cabo durante los meses de Mayo y Junio del 2004, en *Del Valle Urban Search and Rescue Training Site en Santa Clarita, California, USA*. Un total de cuatro vuelos fueron realizados en los cuales el helicóptero seguía diferentes coordenadas GPS, posteriormente el algoritmo de visión tomaba el control de la velocidad lateral del helicóptero alineándolo con la característica seleccionada.

Las figuras 5.20(a) a 5.20(d) muestran las señales generadas en el plano de la imagen para dos vuelos distintos. Las figuras 5.20(a) y 5.20(c) corresponden a comandos de alto nivel de velocidad lateral generados en el plano de imagen, estos han sido normalizados entre ± 1 (m/s). Las figuras 5.20(b) y 5.20(d) muestran la evolución (posición) de la característica en la imagen a lo largo de la secuencia de seguimiento.

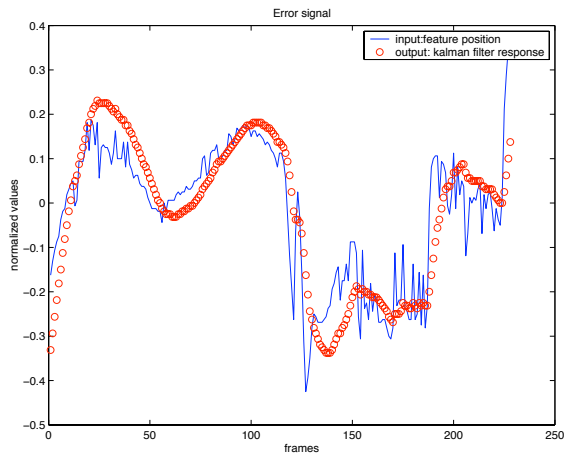
La figura 5.21 muestra las señales de referencia y posición del helicóptero correspondientes a la segunda prueba. La figura 5.21(c) muestra la trayectoria seguida por el helicóptero en el mismo instante de tiempo con relación a la figura 5.21(a), que corresponde a la señal generada en el plano de la



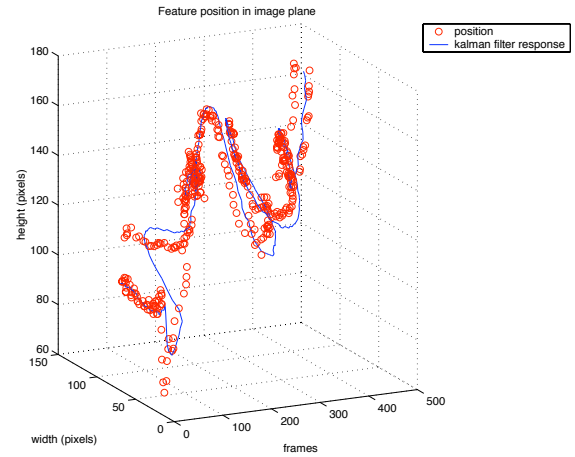
a) señal de error en el plano de la imagen



b) posición de la característica en la imagen



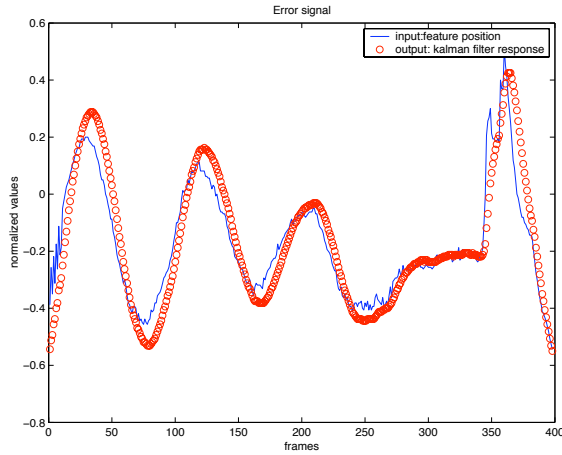
c) señal de error en el plano de la imagen



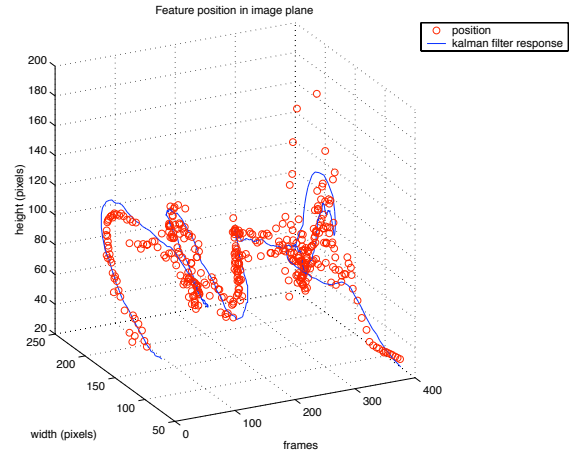
d) posición de la característica en la imagen

Figura 5.20: Señales de error en el plano de la imagen normalizadas entre ± 1 (m/s) y posición de la característica en la imagen a lo largo de la secuencia de seguimiento, en dos vuelos distintos.

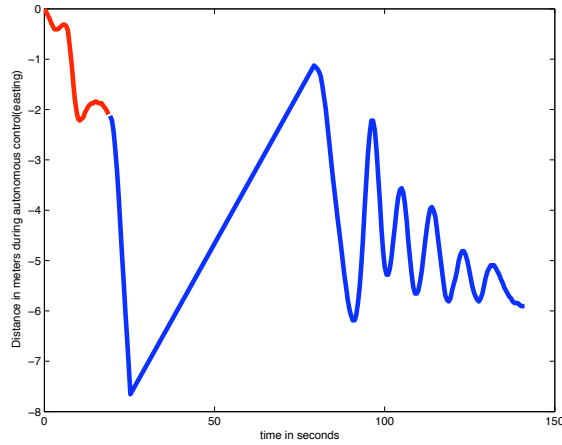
5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos



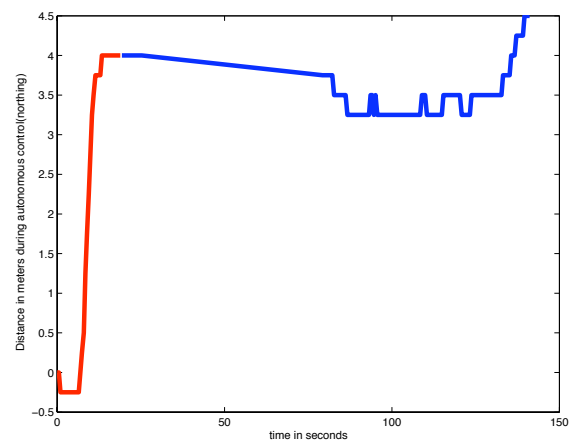
a) señal de error en el plano de la imagen



b) posición de la característica en la imagen



c) evolución de la posición lateral del helicóptero



d) evolución de la posición longitudinal del helicóptero

Figura 5.21: a) Señal de error Normalizada (m/s) b) Posición de la característica en la imagen c) Posición del helicóptero en metros (Coordenadas UTM Easting) d) Posición del helicóptero en metros (Coordenadas UTM Northing)

imagen, se puede observar buena correlación entre los comandos generados por el sistema de visión y la trayectoria seguida por el helicóptero. En las figuras 5.21(c) y 5.21(d) la línea roja indica el momento cuando el helicóptero era comandado por GPS y la línea azul representa el control basado en visión.

También se puede observar en la figura 5.21(c) que el helicóptero estuvo oscilando alrededor de (-4 metros media). Este valor significa la distancia relativa desde el punto de inicio a la característica que se estuvo siguiendo. Las oscilaciones observadas se producen por el término integral del controlador de velocidad lateral que tratan de corregir el error en estado estacionario. También tenemos un periodo considerable de oscilaciones el cual es esperado ya que sólo comandamos pequeños cambios en las consignas (± 1 m/s).

La figura 5.21(d) también muestra como el helicóptero fue comandado hacia una posición deseada y luego una vez la característica fue detectada y seguida el control fue pasado al sistema de visión. Podemos ver como la distancia a la característica se mantuvo constante con pequeñas variaciones, esta variación es esperada ya que se controló el helicóptero usando solo un controlador proporcional de velocidad y no de posición.

5.3.1.5. Discusión

Este apartado ha presentado la implementación de un sistema visual para controlar el desplazamiento lateral de un helicóptero autónomo basándose en la generación de referencias de velocidad lateral a partir de la imagen. Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación sirvieron para el desarrollo de sistemas posteriores más maduros y robustos. El desempeño de los controladores aunque a primera vista presenta inestabilidad, en líneas generales fue satisfactorio ya que permitió en un primer paso validar la propuesta de control visual. Además sirvió para enfocar los recursos en la mejora de los módulos de control de velocidad lateral y detección de

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

contornos. No sólo es necesario trabajar en la robustez de la detección, sino que las condiciones lumínicas de los entornos exteriores deben ser modeladas e incluidas como parte integral del algoritmo de procesamiento de imágenes.

El rendimiento del sistema de procesamiento de imágenes en esta prueba estuvo comprometido por el hecho de que se ejecutó en el mismo ordenador de control de vuelo. La tasa de procesamiento visual fue de 15 fps, pero se estima que con el uso de un ordenador independiente este rendimiento puede ser llevado a los 25 fps. Este trabajo es un primer acercamiento a trabajos posteriores donde esta técnica de control visual se explora con mayor provecho, como es el caso del trabajo descrito a continuación.

5.3.2. Detección y seguimiento de características visuales para el control de velocidad lateral y vertical

El siguiente desarrollo fue llevado a cabo en el DISAM³ en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Este diseño tiene como finalidad controlar la velocidad lateral y vertical de un helicóptero autónomo basándose en la ubicación de las características en la imagen.

En los experimentos presentados, el helicóptero es inicializado en vuelo estacionario en una zona urbana con edificios. Un usuario sobre una estación de tierra, selecciona las características de interés (para la siguiente tarea, ventanas en un edificio) las cuales deben ser seguidas a lo largo de la secuencia de imágenes y con las cuales el helicóptero debe alinearse mediante control visual. En seguida se presentan las técnicas y metodologías empleadas para dicha tarea.

5.3.2.1. Procesamiento de imágenes

El algoritmo de visión descrito a continuación es responsable del seguimiento visual de las características elegidas por el usuario. El componente principal de este sistema es un seguidor que emplea un algoritmo de Lucas-Kanade [Lucas and Kanade, 1981], [Tomasi and Kanade, 1993]. Este trabajo propone un método de selección de puntos característicos que en lugar de escoger los puntos por un criterio arbitrario de textura, selecciona aquellos para los que se demuestra analíticamente que son capaces de optimizar la precisión del seguimiento, es decir, aquellos cuyas correspondencias pueden ser establecidas con mayor fiabilidad. El método considera en primer lugar el procedimiento que se usará para determinar la correspondencia entre un punto y su homólogo en el siguiente cuadro de la secuencia. Se trata de

³División de Ingeniería de Sistemas y Automática

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

la minimización de un criterio de similitud basado en sumas de diferencias al cuadrado entre los píxeles de una pequeña ventana local de integración alrededor del punto candidato en los dos cuadros de imagen consecutivos. Se estudian dos casos: en el primero [Lucas and Kanade, 1981] se asume que la ventana se desplaza con una simple traslación (se considera que la matriz de píxeles no sufre deformación alguna); en el segundo [Shi and Tomasi, 1994] se establece que la ventana puede sufrir una transformación afín de un cuadro al siguiente, además de considerar su traslación, intenta modelar la posible deformación sufrida.

El planteamiento del problema parte de nuevo de la ecuación que expresa que el brillo de un determinado punto de la imagen correspondiente a un instante de tiempo t no cambia cuando este sufre un desplazamiento d en una segunda imagen correspondiente a un instante de tiempo $t + \tau$. Ahora se considera la imagen como una función que toma valores en un dominio espacio-temporal continuo $f(i, j, t)$ ($i, j \in \mathbb{R}^2, t \in \mathbb{R}$). Dos factores importantes de todo algoritmo seguidor de características son la robustez y la precisión. La precisión tiene que ver con el cómputo subpixel en la ventana local. Una ventana local pequeña sería preferible ya que no deseamos "suavizar" los detalles contenidos en la imagen. La robustez se relaciona con la sensibilidad del seguimiento ante diferentes condiciones lumínicas, tamaño de la imagen, movimiento, etc. Intuitivamente, para manejar largos desplazamientos es preferible una ventana local grande, por consiguiente existe un compromiso entre precisión local y robustez cuando se define el tamaño de la ventana local de integración.

En líneas generales el algoritmo se puede expresar de la siguiente forma:

Consideremos un punto $u = [i \ j]^T$ en la imagen I . El objetivo del seguidor es encontrar la posición $v = u + d = [i + d_i \ j + d_j]^T$ en la segunda imagen J tal que $I(u)$ y $J(v)$ sean similares. El vector $d = [d_i \ d_j]^T$ es la velocidad visual en i , también conocida como flujo óptico en i . Se define la velocidad visual d como el vector que minimiza la función residual ε definida como:

$$\varepsilon(d) = \varepsilon(d_i, d_j) = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W (I(i, j) - J(i + d_i, j + d_j))^2 w(x) \quad (5.24)$$

W es la ventana considerada alrededor del punto $[i, j]$ y $w(x)$ es una función de ponderación que permite dar diferente peso a los distintos puntos de la ventana

El cómputo de esta expresión se limita por tanto a la obtención de los gradientes espaciales y temporales de la imagen en el área considerada, que suelen aproximarse mediante diferencias. Para solucionar finalmente el sistema se aplica el método de Newton-Raphson que generalmente converge a la solución en pocas iteraciones.

La siguiente figura 5.22, resume el proceso de seguimiento en una secuencia durante un vuelo experimental. Los puntos visualmente seguidos corresponden a las cuatro esquinas de una ventana. El centro de gravedad de estos cuatro puntos se usa como punto central para la generación de las referencias visuales de velocidad. Dicho punto posee coordenadas $[i, j]$ en la imagen. Las ecuaciones que generan las referencias de velocidad vertical y lateral, vienen dadas por la ecuación 3.29 y la ecuación 3.22, respectivamente.

5.3.2.2. Resultados

Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos durante diferentes pruebas experimentales llevadas a cabo en una zona urbana. La prueba consiste en simular una inspección en un edificio donde se escogen diferentes características (en nuestro caso ventanas sobre la fachada del edificio), el usuario en tierra sobre una interfaz gráfica escoge las ventanas las cuales deben ser seguidas, y mediante comandos de velocidad de alto nivel el helicóptero se alinea con dichos objetivos.

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos



Figura 5.22: Resultado del algoritmo de seguimiento sobre una secuencia de imágenes durante un vuelo experimental. Puntos en color rojos denotan los objetivos visualmente seguidos.

Un total de siete vuelos experimentales fueron llevados a cabo durante días diferentes con el objetivo de validar la propuesta de control visual. En los experimentos el helicóptero es comandado a volar autónomamente hasta una coordenada GPS en la cercanía del edificio, donde a continuación una vez el usuario escoge la ventana, el helicóptero se alinea con esta característica objeto de seguimiento. Del conjunto de experimentos se han tomado los dos con los resultados más significativos. Información adicional sobre las pruebas experimentales se puede encontrar en <http://www.disam.upm.es/colibri>. Las figuras 5.23 y 5.24 muestran los resultados de estos experimentos. Los datos tomados del registro general del helicóptero se muestran en las figuras 5.23(f) y 5.24(f). La tarea de control visual ocurre durante $250 < t < 400$ seg y $700 < t < 1650$ seg, respectivamente.

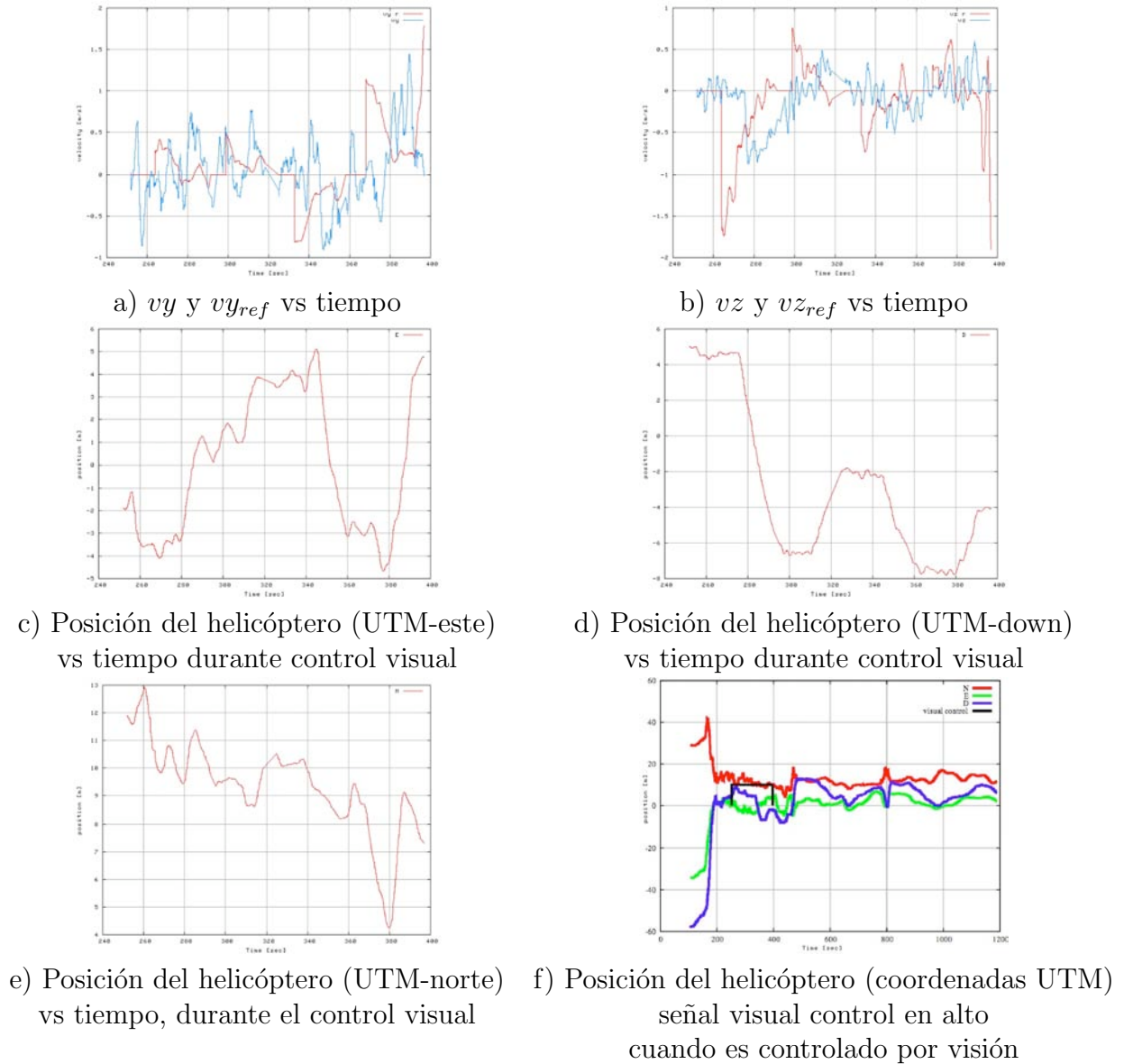


Figura 5.23: Sexto vuelo experimental. Las subfiguras a) a e) muestran las señales durante el control visual, subfigura f) muestra el desplazamiento del helicóptero durante la totalidad del vuelo.

5.3. Detección y seguimiento de características externas en entornos urbanos

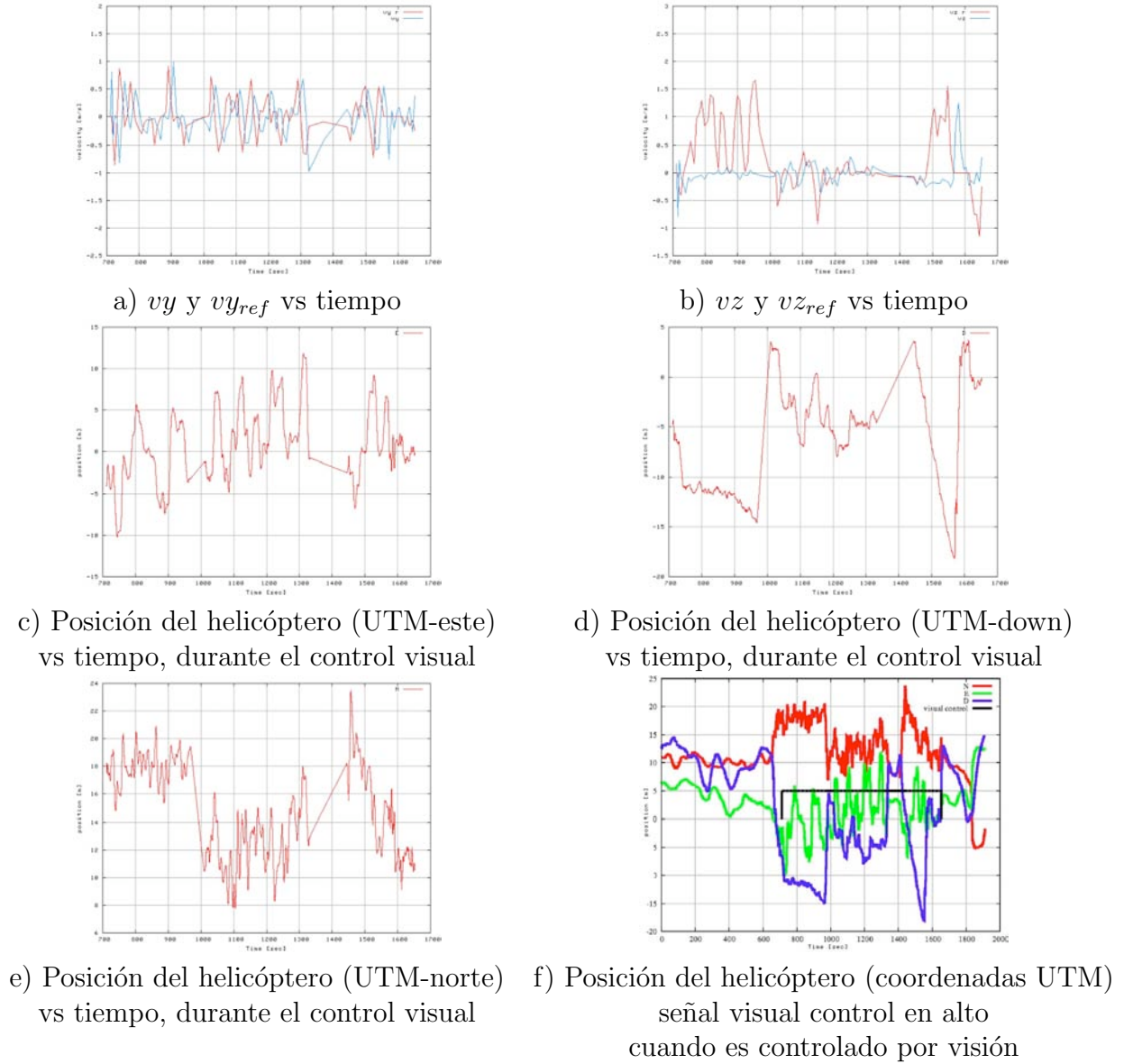


Figura 5.24: Séptimo vuelo experimental. Las subfiguras a) a e) muestran las señales durante el control visual, subfigura f) muestra el desplazamiento del helicóptero durante la totalidad del vuelo.

Las figuras 5.23(a-e) y figuras 5.24(a-e) muestran el desplazamiento del helicóptero y las referencias visuales durante el control visual. En las figuras 5.23(a) y 5.23(b) se puede observar las referencias visuales y su correlación con la velocidad del helicóptero, tanto lateralmente como verticalmente. La gráfica 5.23(b) correla las referencias verticales (vz_r) con la velocidad vertical del helicóptero (vz), en ésta se puede observar la correspondencia entre las dos señales que causan los desplazamientos en altitud (D) observados en la gráfica 5.23(d). Análogamente, la gráfica 5.23(a) y 5.23(c), relaciona las referencias visuales de velocidad (vy_r) con la velocidad del helicóptero (vy), causando el desplazamiento (E) observado en la gráfica 5.23(c). La referencias visuales de velocidad son dadas en el sistema de referencia del helicóptero (body frame). Para esta tarea en particular una referencia negativa de vy_r causa una evolución negativa en el desplazamiento lateral del helicóptero⁴. Valores negativos en vz_r causarán que el helicóptero ascienda (evolución negativa in D) y valores positivos causarán que el helicóptero descienda.

En términos generales se puede observar que el control visual es capaz de generar las referencias de velocidad requeridas por el helicóptero para lograr el seguimiento de las características (en nuestro caso ventanas). De las figuras 5.23(a-b) y figuras 5.24(a-b) se puede observar cuando hay un cambio significativo en la posición de la ventana objeto de seguimiento, ya que esto produce un escalón en el plano de la imagen que corresponde con las referencias de velocidad requeridas por el helicóptero para lograr alinearse con el objetivo. Estas referencias visuales por consiguiente generan los desplazamientos necesarios para hacer un seguimiento visual de las ventanas. Aunque, en nuestro caso las coordenadas espaciales (coordenadas del mundo) de los objetos que se quieren seguir visualmente no se conocen, se puede observar en las gráficas 5.23(a)(b) y 5.24(a)(b) que las referencias y las velocidades convergen a cero lo que implica que el objetivo ha sido cen-

⁴La posición lateral y longitudinal del helicóptero corresponde a este y norte en este conjunto de experimentos en particular. Esto se debe a que el helicóptero estaba volando con su parte frontal apuntando hacia en norte. Lo cual no es cierto en todos los casos.

trado en la imagen, y por ende el helicóptero se ha alineado con la ventana.

El comportamiento observado en la gráficas 5.23(e) y 5.24(e) no es deseable, pero es esperado ya que durante la tarea la velocidad longitudinal (vx_r) se fija a cero, lo que no garantiza que el helicóptero mantenga su posición longitudinal, ya que se realiza un control de velocidad y no de posición. En este orden se podría esperar que una combinación de ambos controles, es decir, posición y velocidad podría mejorar el desempeño general.

La frecuencia de actualización con la cual el procesamiento visual envía las referencias al control de vuelo es uno de los parámetros críticos en el sistema. Al ser esta frecuencia de un valor considerable se logra un desplazamiento más continuo, en general un comportamiento más estable.

Esto es de esperar ya que el algoritmo de visión envía referencias de entrada (con una frecuencia dada) a un control de más bajo nivel. Una frecuencia de actualización baja causa tiempos de reacción largos y un pobre desempeño ante perturbaciones. En este conjunto de pruebas experimentales se consiguio enviar referencias a 20 fps. La simplicidad del algoritmo y el hecho de que el seguimiento visual se enfoca en seguir cuatro puntos (esquinas de una ventana) sobre la imagen permita alcanzar estas frecuencias en el procesado visual.

5.3.2.3. Discusión

Se ha desarrollado un sistema visual para controlar el desplazamiento lateral y vertical de un helicóptero autónomo basándose en las características detectadas en la imagen, y usando la posición de estas características en la imagen para generar referencias de velocidad lateral y vertical simultáneamente. El algoritmo desarrollado ha servido principalmente para evaluar la propuesta de control visual hecha en el capítulo 3.

Las referencias visuales generadas han permitido influir en el despla-

zamiento del helicóptero logrando modificar su trayectoria para seguir visualmente un objetivo dado. La tarea diseñada para este fin ha sido una inspección simulada de una fachada de un edificio, siendo las características y/o objetos de interés ventanas.

Los experimentos pretenden fundamentalmente evaluar los resultados de selección y seguimiento de características, así como su integración con un controlador de vuelo de un vehículo aéreo autónomo. La influencia de ciertas condiciones y comportamientos debidos a ciertos parámetros han sido encontrados experimentalmente, siendo algunos de ellos críticos como es el caso de la frecuencia de actualización.

Como limitación del sistema, cabría mencionar la incapacidad de controlar el movimiento longitudinal del helicóptero, dada la falta de percepción de profundidad por parte del algoritmo de visión. Hecho que actualmente forma parte de los trabajos en progreso.

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

El siguiente desarrollo fue llevado a cabo en el laboratorio de sistemas autónomos del CSIRO⁵. Este diseño tiene como finalidad controlar la velocidad lateral y longitudinal de un vehículo aéreo autónomo basándose en la ubicación de las características en la imagen.

El desarrollo presentado en este apartado tiene como finalidad proveer de un mecanismo de seguridad basado en visión por computador a un vehículo aéreo autónomo en caso de situaciones críticas donde se requiera aterrizar en zonas seguras. Esta propiedad es particularmente útil en entornos urbanos donde la naturaleza del entorno requiere de sistemas que eviten el daño a personas, propiedad privada, etc. Los objetivos propuestos para este sistema son:

- *Detección de zonas seguras para el aterrizaje.* se entiende por zonas seguras aquellas zonas despejadas en tierra, libres de obstáculos y de tamaño acorde con el tamaño de la plataforma. La plataforma una vez recibida una señal de emergencia se comanda a aterrizar sobre esa zona en un tiempo dado.
- *Detección de líneas eléctricas para evasión de obstáculos.* La tarea simulada requiere que la plataforma vuele sobre un modelo a escala de líneas eléctricas. Una vez recibida la señal de emergencia el sistema debe evadir las líneas y a continuación aterrizar.

El sistema de visión descrito en este apartado actúa como controlador de alto nivel enviando consignas de velocidad en el plano de la imagen a un control de bajo nivel para comandar los desplazamientos longitudinales

⁵Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. ICT Centre. Brisbane. Australia

y laterales del simulador mientras realiza un aterrizaje en un tiempo dado. El aterrizaje se dice es forzoso, ya que este se realiza dada una restricción de tiempo. En los experimentos descritos más adelante el simulador (cable array robot [Usher et al., 2005]) es comandado a realizar un vuelo a lo largo de líneas eléctricas (modelo a escala) hasta que una señal de emergencia es enviada al sistema, momento en el cual el sistema debe en primer lugar evitar las líneas y a continuación detectar una área segura para realizar un aterrizaje dadas unas restricciones de tiempo. La señal de emergencia es una consigna con un valor predeterminado que se envía al sistema de visión. Esta señal puede ser activada por un operador o definida para ser activada aleatoriamente durante el vuelo.

El simulador y la zona experimental donde se desarrollaron las pruebas experimentales se muestran en la figura 5.25.



(a) Simulador de vehículos aéreos (b) SVA mientras sigue las líneas (SVA) en tierra después de una prueba eléctrica.
ba experimental.

Figura 5.25: Area experimental donde se desarrollaron los experimentos. Se muestra un escenario a escala con líneas eléctricas y obstáculos sobre el suelo.

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

5.4.1. Simulador hardware experimental: Simulador de vehículo aéreos–SVA

El SVA (figura 5.26) es un robot compuesto por 4 cables acoplados a motores que cubren un área aproximada de 12m largo x 8m ancho x 6.3m alto. Cada cable acoplado a un motor puede moverse a una velocidad específica. El simulador es controlado por un computador independiente conectado a una red ethernet. El efector final mostrado en la figura 5.25 es una caja metálica de color amarillo, la cual se puede ver en detalle en la figura 5.28.

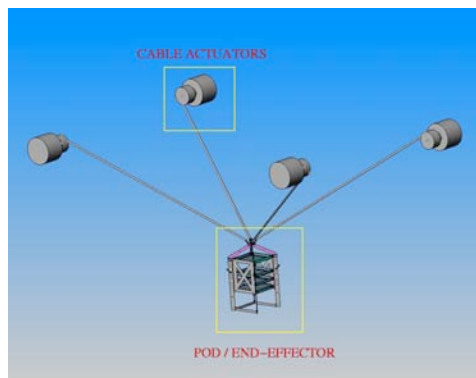


Figura 5.26: Breve esquema de la disposición del robot y los cables: Simulador de Vehículos Aéreos.

Esta caja alberga el computador de a bordo, sensores, cámaras y baterías para alimentar el sistema. El ordenador está basado en un modelo mini-ITX y los sensores básicos comprenden cámaras firewire, una EiMU –unidad de medida inercial– [Corke et al., 2002], etc con la posibilidad de albergar otros sensores y componentes. El movimiento de la caja se realiza a través de movimientos individuales de cada cable. El control es hecho generando una serie de comandos de velocidad que son enviados a cada motor acoplado a cada cable. El control está dividido en dos modos: *control de posición* y *control de velocidad*. Cada modo de control es capaz de aceptar referencias externas de posición o velocidad, bien sea del computador de a bordo u otro

usuario / proceso conectado a la red ethernet. Un protocolo llamado DDX (Dynamic Data Exchange) [Corke et al., 2004a] se usa para intercambiar mensajes entre procesos que se ejecutan separadamente.

5.4.2. Procesamiento visual

El algoritmo de procesamiento visual desarrollado consta de dos etapas. En primer lugar un algoritmo para la detección y seguimiento de líneas es usado como mecanismo de evasión de líneas eléctricas. Una vez se recibe la señal de emergencia el sistema comienza el proceso de evasión, a continuación cuando el algoritmo no detecta ninguna línea en el campo visual, el sistema cambia a modo aterrizaje donde se busca una área despejada en la imagen y usando la ubicación de esta área en la imagen se comanda el simulador mientras desciende, para hacer un aterrizaje en dicha área.

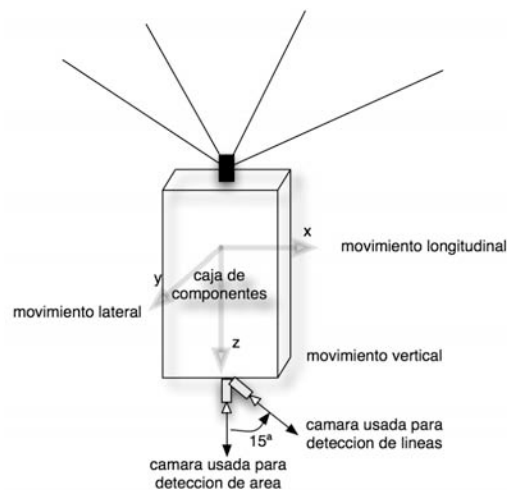


Figura 5.27: Referencias usadas para el sistema de abordó. Esquema general de la disposición de las cámaras en el efector final.

Dos cámaras colocadas en la parte inferior del sistema abordó se usan para este fin, figura 5.27. Una cámara esta dispuesta de forma que su eje

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

óptico es perpendicular al suelo, apunta hacia abajo. Esta cámara es usada durante el descenso y detecta áreas despejadas para el aterrizaje. Otra cámara cuyo eje óptico forma un ángulo aproximado de 15 grados con respecto a la vertical. Esta cámara se usa para la detección de las líneas eléctricas. La disposición de la cámara y la trayectoria de vuelo del simulador hace que las líneas aparezcan en la imagen como líneas verticales con diferentes ángulos de inclinación, ver figura 5.29. La disposición real del sistema se muestra en la figura 5.28.



Figura 5.28: Vista del simulador sobre las líneas eléctricas. Disposición final de las cámaras para la detección de líneas y zonas de aterrizaje, respectivamente.

5.4.2.1. Detección de líneas eléctricas para evasión de obstáculos

Inicialmente, y hasta que la señal de emergencia es recibida, la etapa de detección de líneas se ejecuta continuamente. La parte principal de este algoritmo consiste en la Transformada de Hough [P. V. C. Hough, 1962],

[Illingworth and Kittler., 1997], [Cucchiara and Fillicori., 1998]. En primer lugar, un preprocesamiento previo es realizado en la imagen el cual consiste en aplicar un detector de bordes verticales usando una mascara de sobel. Como resultado, sólo se conservan los bordes verticales que contribuyen a la detección de segmentos de líneas. Seguido los bordes son dilatados y umbralizados lo que resulta en una imagen binaria con fuertes bordes verticales. Esta imagen binaria es donde se aplica la Transformada de Hough para extraer los segmentos de líneas más significativos. Una vez se detectan la líneas, éstas quedan definidas el espacio de Hough por un ρ y un θ . Dada la configuración de la cámara (figura 5.29) y con el objeto de filtrar falsos positivos solo aquellas líneas que cumplen con la condición de que $\theta > 130^\circ$ y $\theta < 45^\circ$ son escogidas como validas. Una vez se tiene un conjunto de líneas validas se procede a calcular el centro de gravedad (C.G) del conjunto de líneas. A partir del ρ y θ de cada línea, su coordenada (x,y) de su punto medio de puede calcular. Solo la coordenada x de cada línea se usa para calcular el C.G, mientras la coordenada y se fija a la mitad de la altura de la imagen $\frac{imageheight}{2}$. La ecuación que determina el centro de gravedad de las líneas es:

$$c_x = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (5.25)$$

El C.G. del conjunto de líneas se denota como $C = [c_x \ c_y]$. Este centro de gravedad es ilustrado en la figura 5.29 como un círculo blanco, donde c_x es dado por la ecuación 5.25 y $c_y = \frac{imageheight}{2}$, M es el numero de líneas.

5.4.2.2. Detección de áreas seguras para el aterrizaje

El algoritmo descrito a continuación esta basado en un descriptor de contraste similar al mostrado en [Garcia-Pardo et al., 2001]. Este parámetro es usado para calcular un umbral global *óptimo*. Este umbral es aquel que solo conserva los bordes que describen las fronteras entre obstáculos, mientras se remueven las texturas de fondo y otros bordes espurios. El parámetro se deriva normalizando la imagen de bordes y calculando el promedio (μ) y la

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

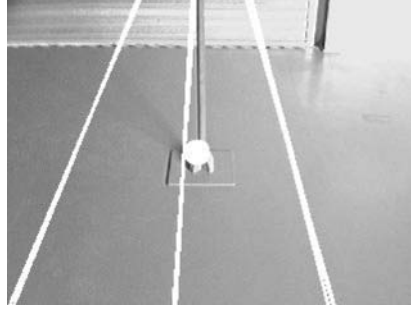


Figura 5.29: Detección de líneas eléctricas desde la perspectiva de la cámara. El centro de gravedad de las líneas se muestra como un círculo blanco. El SVA vuela sobre las líneas y usa la cámara dispuesta con un ángulo de 15° .

desviación estándar de su histograma. El umbral global *óptimo* que es un porcentaje en pixeles viene dado por

$$Tr = C_r + 3,7724 \frac{\mu}{\sigma} \quad (5.26)$$

Esta ecuación se deriva al encontrar la recta que mejor ajusta en la gráfica C_r vs $\frac{\mu}{\sigma}$. Para diferentes imágenes se encuentra el mejor valor de C_r y $\frac{\mu}{\sigma}$ con el cual solo se mantiene las fronteras de los obstáculos y remueve el resto. Para esta tarea en particular se toma la ecuación 5.26 y se encuentra el valor de C_r empíricamente igual a 97. Una vez se calcula este umbral, es aplicado a la imagen de bordes con lo que resulta una imagen binaria, donde los bordes sobresalientes son aquellos que corresponden a los contornos entre obstáculos.

El cómputo del área segura comienza con la elección del mayor espacio entre bordes. Este cómputo se realiza de una manera creciente donde la semilla inicial o punto inicial puede ser, bien sea, fijado en una posición dada sobre la imagen o en la dirección en la cual el vector de velocidad del simulador apunta. En la tarea siguiente, el área comienza a calcularse en el centro de la imagen ya que el vector de velocidad del simulador es fijo en

la dirección x . La posición de esta área se usa para generar las consignas visuales de velocidad al controlador de velocidad del simulador.

5.4.3. Estrategia de control visual

Durante el procesamiento de imágenes, dado que la detección y seguimiento de objetos se realiza en el plano de la imagen, la respuesta de tal algoritmo es la de proporcionar velocidad en el plano de la imagen. Esta respuesta representa la referencias de velocidad en el plano de la imagen para el simulador. Existen dos casos en los cuales la información visual se usa para el control visual pero con dos fines diferentes. En ambos casos las coordenadas en la imagen de los objetivos visuales, bien sean, las líneas eléctricas o el área de aterrizaje se usan para generar consignas de velocidad para el simulador. La figura 5.31 muestra el sistema de referencias de la cámara con respecto al simulador. El plano de la imagen, que se denota π , tiene su origen en la esquina superior izquierda y es donde las referencias son definidas. Las referencias vienen dadas por las componentes de velocidad en x e y . La señal de error se escribe en forma vectorial para expresar componentes en i y j de la forma $\vec{e} = \hat{v}x_r j + \hat{v}y_r i$. Si la cámara se coloca aproximadamente sobre el centro de gravedad del simulador, las distancias d y dv en la gráfica 5.31 se pueden aproximar a cero. Dadas la aproximaciones definidas en el capítulo 3, al hacer que la señal e tienda a cero se logra que el simulador se desplace alineándose con el objetivo. Estas referencias vienen dadas por

$$vx_r = -k_L \frac{(c_i - \frac{h}{2})}{h/2} \quad (5.27)$$

$$vy_r = k_l \frac{(c_j - \frac{w}{2})}{w/2} \quad (5.28)$$

donde w es el ancho de la imagen y h el alto. c_i y c_j son las coordenadas del objetivo o característica antes mencionado.

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

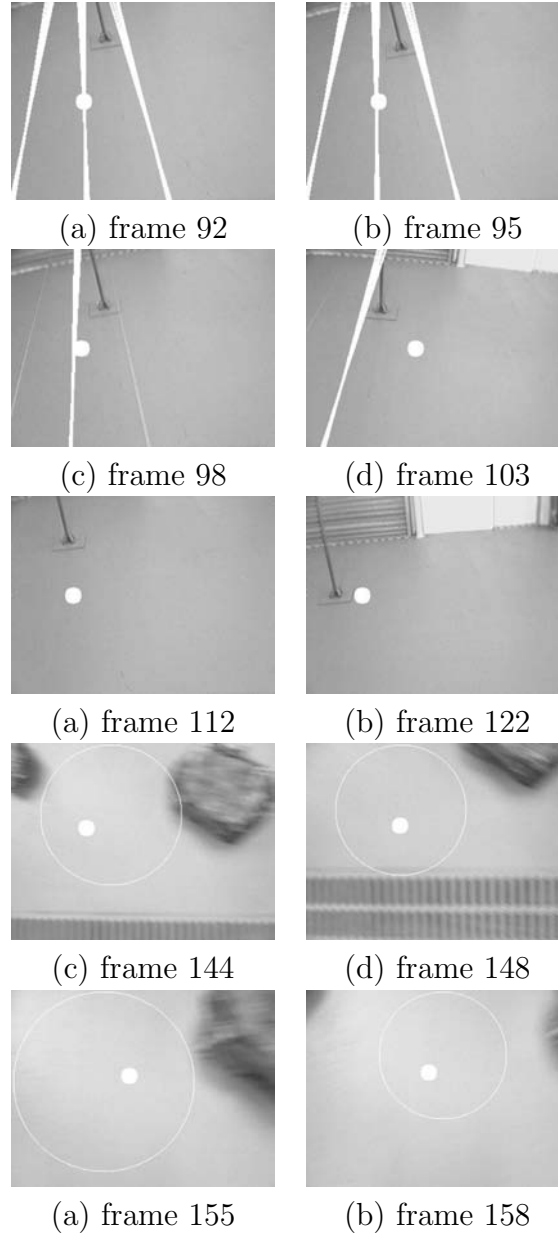


Figura 5.30: Secuencia extraída del procesamiento de imágenes a bordo durante una prueba experimental.

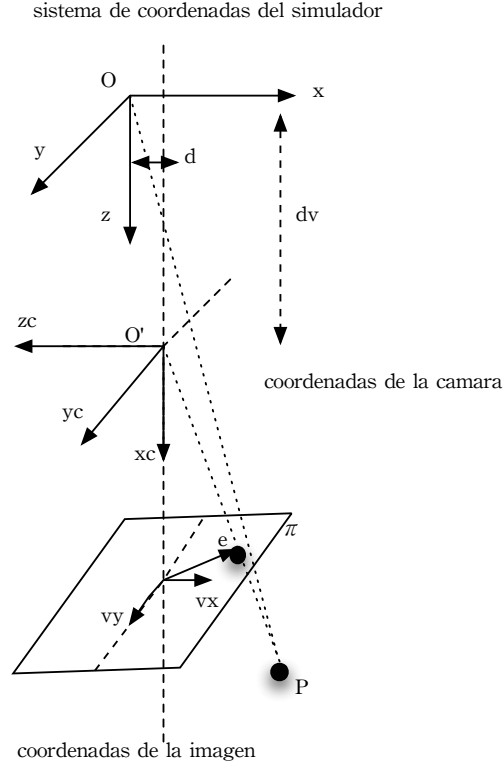


Figura 5.31: Sistema de referencias del simulador, la cámara y la imagen

En el caso de evasión de líneas las referencias laterales se convierten en $(-vy_r)$, se usa el valor complemento para mover el simulador contrario a la posición del objeto en la imagen. Cuando el simulador esta evadiendo las líneas las referencias vx_r y vz_r son fijadas cero mientras vy es dada por 5.28, con el signo negativo. Una vez el sistema cambia a modo aterrizaje, vx y vy vienen dadas por las ecuaciones 5.27 y 5.28 mientras vz es fijada de tal forma de descender en un tiempo determinado. La figura 5.30 muestra la secuencia de imágenes durante una prueba experimental. Se puede observar como el sistema cambia del modo evasión de líneas al de aterrizaje, donde

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

el círculo blanco representa la posición a partir de la cual las referencias de velocidad son calculadas.

5.4.4. Pruebas experimentales: Resultados

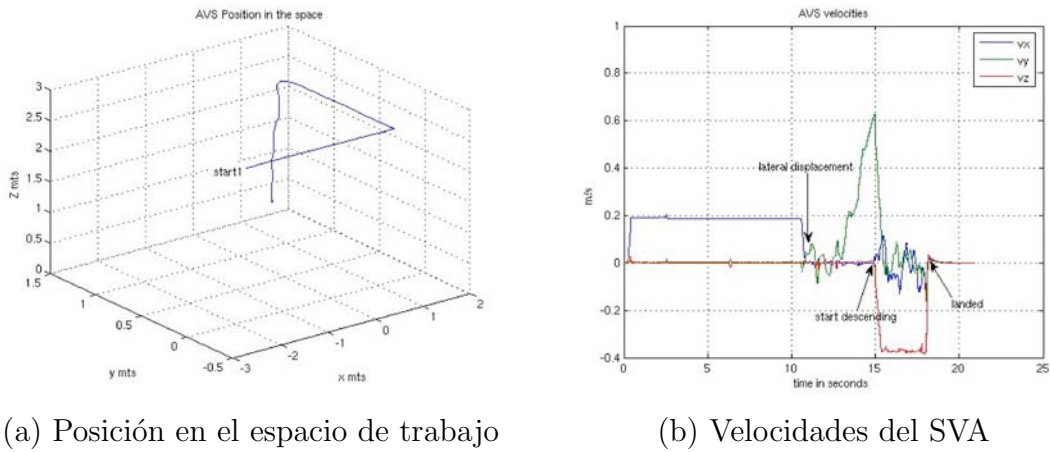


Figura 5.32: Resultados de la segunda prueba experimental. Subfigura a) muestra la posición del SVA en el espacio de trabajo durante esta prueba. Subfigura b) muestra las velocidades del simulador en (m/s)

Un total de 10 simulaciones de vuelo fueron realizadas en un entorno a escala provisto de líneas eléctricas, obstáculos y texturas sobre un terreno artificial. Durante los experimentos en SVA es comandado a volar sobre las líneas, hasta que una señal externa de emergencia es enviada al sistema. Las figuras (5.32) a (5.35) muestran los resultados de la segunda y la sexta prueba experimental. La figura 5.32(a) muestra la condición en la cual el SVA es forzado a aterrizar a la izquierda de las líneas electricas. La figura 5.34(a) muestra el SVA cuando es forzado a aterrizar a la derecha de las líneas eléctricas. En ambos casos las figuras 5.32(b) y 5.34(b) representan las velocidades del SVA que causan los respectivos movimientos. La

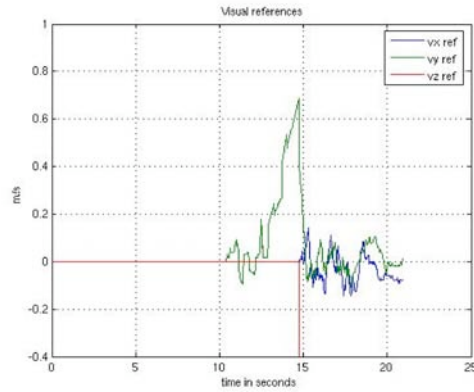
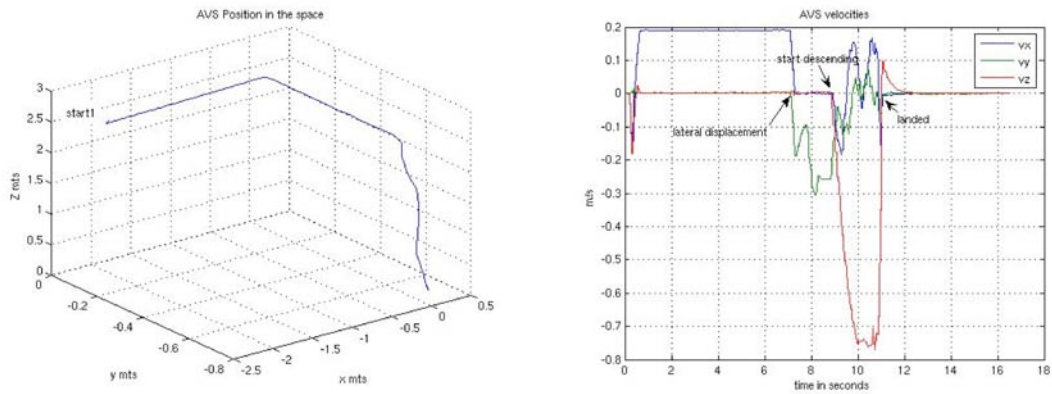


Figura 5.33: Resultados de la segunda prueba experimental. Referencias visuales generadas por el algoritmo visual



a) Posición en el espacio de trabajo

(b) Velocidades del SVA

Figura 5.34: Resultados de la sexta prueba experimental. Subfigura a) muestra la posición del SVA en el espacio durante esta prueba. Subfigura b) muestra las velocidades del SVA en (m/s)

5.4. Control visual para aplicaciones de inspección y aterrizaje de emergencia usando un simulador de vehículos aéreos

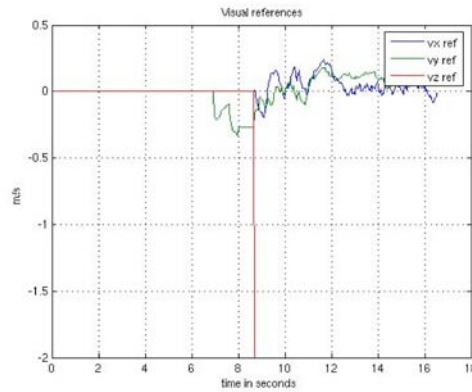


Figura 5.35: Resultados de la sexta prueba experimental. Referencias visuales generadas por el algoritmo de procesamiento visual.

figura 5.33 relaciona las referencias visuales enviadas por el sistema visual al control del simulador con los desplazamientos del mismo, durante la segunda prueba experimental. El valor pico observado en las referencias alrededor de $t=15$ s causa el desplazamiento lateral a la izquierda durante la maniobra de evasión. A continuación el sistema cambia a modo aterrizaje, con lo que la velocidad de descenso se fija a -0.4 m/s, mientras las velocidades v_x y v_y son controladas por el algoritmo visual. De manera similar, la figura 5.35 muestra alrededor de $t=8$ s un valor pico el cual causa el desplazamiento a la derecha durante la maniobra de evasión de la línea. Su respuesta (velocidad del SVA) se muestra en la figura 5.34(b) en $t=8$ s.

Las gráficas mostradas anteriormente indican cuando el SVA se mueve lateralmente evadiendo las líneas y cuando comienza el descenso. Diferentes velocidades de descenso son definidas durante los experimentos mostrados, las cuales causan que SVA descienda aproximadamente en 3.2 y 2.1 segundos enviando referencias de -0.4 m/s y -2 m/s, respectivamente. La dinámica del simulador y la baja altitud en la cual se realizaron las pruebas previenen que el SVA alcance los valores de velocidad vertical comandados y por

tanto el tiempo máximo especificado para el aterrizaje. A pesar de ello se puede observar una correlación entre las referencias visuales de velocidad y las velocidades del SVA.

5.4.5. Discusión

El presente desarrollo ha demostrado experimentalmente una estrategia para aterrizar un simulador de vehículos aéreos en situaciones de emergencia donde el tiempo de aterrizaje *seguro* es la principal restricción. Los resultados conseguidos en un escenario a escala con líneas eléctricas y obstáculos sobre el terreno son preliminares, el desempeño y respuesta del sistema muestra que la propuesta puede ser extrapolada a tareas reales. Antes de acometer una tarea en un escenario real, un extensivo conjunto de pruebas deben ser realizadas incluyendo las condiciones ambientales, ya que la robustez del sistema propuesto recae principalmente en la información extraída del procesamiento de las imágenes.

Debido a una limitación en el diseño del simulador que no permite controlar los ángulos de actitud, estos no fueron incluidos en las correcciones de las referencias velocidad. Sin embargo, es importante la influencia de los ángulos pitch y roll en los valores de vx_{ref} and vy_{ref} , ya que las referencias son directamente proporcionales a los ángulos de la cámara. Un cambio en el roll o pitch de la cámara causan desplazamientos de las características en la imagen y por tanto de las referencias visuales de velocidad. Fusionando la información visual con las medidas inerciales permite incrementar la robustez y reaccionar antes los cambios de actitud.

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

El trabajo expuesto a continuación ha sido desarrollado en el grupo IDA-AIICS⁶ de la Universidad de Linköping, Suecia, concretamente en el grupo de vehículos aéreos autónomos y contempla el desarrollo de algoritmos de visión por computador para la navegación autónoma de un Vehículo Autónomo Aéreo.

El trabajo propone un mecanismo basado en visión por computador usando un par estereoscópico, para la navegación de un vehículo aéreo sobre zonas donde la recepción de la señal GPS no esta disponible. La señal GPS es tradicionalmente usada como sensor principal para la localización y navegación de vehículos aéreos. Por esta razón cuando esta señal falla, la navegación se vuelve una tarea incierta. Estas zonas por lo general se encuentran en entornos urbanos o cercanos a zonas con edificaciones. Esta solución es particularmente útil en estas áreas donde la naturaleza del entorno requiere sistemas que aseguren la continuidad de la navegación y eviten daños a personas, propiedades o el vehículo mismo.

El sistema se ha desarrollado y probado en dos fases usando dos plataformas, una terrestre -un robot móvil y otra -un helicóptero autónomo. A continuación se describe el desarrollo y resultados obtenidos de pruebas experimentales mostrando los alcances más significativos.

5.5.1. Visión por computador para la navegación

La auto-localización de un robot en su ambiente operacional, es una de las tareas más importantes para lograr su autonomía. La precisión en la localización (o posicionamiento) es un factor primordial en tareas de navegación. Diferentes métodos se han propuesto con el propósito de aumentar

⁶Artificial Intelligence & Integrated Computer Systems Division

la precisión y la robustez de la localización. Estos se pueden clasificar en métodos de localización relativa o absoluta. Uno de los métodos más extendidos de posicionamiento relativo ha sido el llamado dead-reckoning [Ojeda et al., 2004], [Borenstein et al., 1996] el cual usa principalmente la odometría y las medidas inerciales. Por el contrario, GPS, active beacons y métodos basados en patrones visuales son ejemplos de posicionamiento absoluto [Borenstein et al., 1996].

En este desarrollo, la propuesta de procesamiento visual para el posicionamiento se basa en estimar el movimiento del vehículo por medio del seguimiento de características sobresalientes en la imagen. Esta técnica se conoce como odometría visual [Matthies and Shafer, 1987], [Matthies, 1989]. La odometría visual consigue estimar el movimiento de la cámara a través del seguimiento de características en la imagen, para luego aplicar una transformación y calcular el movimiento de la cámara. Diferentes propuestas de odometría visual se han hecho en los últimos años, las mismas van desde el uso de una cámara [Nistér et al., 2004], [Roumeliotis et al., 2002], [Corke et al., 2004b] o estéreo [Dunbabin et al., 2005], [Corke et al., 2000], [Mallet et al., 2000] estando la diferencia básicamente en las características visuales seguidas y la transformación usada para hallar el movimiento de la cámara. Aplicaciones de odometría visual orientadas a una aplicación específica se mencionan en [Caballero et al., 2006] y [Caballero et al., 2005].

Los objetivos planteados inicialmente para el sistema son los siguientes:

- El sistema debe ser integrado con las medidas inerciales. Utilizando sólo la información extraída del análisis de las imágenes se debe proporcionar referencias de posicionamiento al sistema de navegación. Se considera información útil para la navegación la velocidad, el desplazamiento y la altura relativa del vehículo.
- Tomado como punto de partida el uso de un sistema estéreo visual, mediante la detección y emparejamiento de las características detectadas en ambas imágenes, y usando la disparidad entre características

emparejadas se calcula la altitud (o profundidad) del sistema con respecto al suelo o plano donde se encuentran los puntos sobresalientes.

- El análisis de las imágenes debe funcionar sin ninguna marca especial o patrón de seguimiento. Teniendo la posibilidad de funcionar de manera similar en entornos interiores y exteriores.

5.5.2. Detección de puntos sobresalientes en la escena

Los puntos sobresalientes en la escena son calculados hallando aquellos puntos de máxima curvatura de la imagen utilizando directamente los valores de intensidad de los píxeles. Este método define una medida que se suele denominar de *esquinidad* o C la cual se calcula para todos los puntos de la imagen. Cuando esta medida supera un cierto umbral se considera que el punto es una esquina. Para calcular estos puntos se usa la variante propuesta por Noble [Noble, 1989] del operador denominado *detector de Harris* [Harris and Stephens, 1988], que propone hallar el valor de esquinidad como sigue:

- Se calcula el gradiente en x , I_x y el gradiente en y , I_y usando una máscara de convolución, figura 5.36.
- Se calcula I_x^2, I_y^2 y $I_x I_y$.
- Usando un kernel gaussiano de desviación estándar σ calcular las medias $\langle I_x^2 \rangle, \langle I_y^2 \rangle$ y $\langle I_x I_y \rangle$, donde $\langle I_x^2 \rangle = I_x^2 * g$ sobre una ventana W , siendo g el kernel gaussiano de σ dado..
- Calcular C como:

$$C = \frac{\langle I_x^2 \rangle + \langle I_y^2 \rangle}{\langle I_x^2 \rangle \langle I_y^2 \rangle - \langle I_x I_y \rangle^2} \quad (5.29)$$

Un buen punto es aquel con un valor bajo de C , y el mejor punto es aquel con el valor más bajo de C . Una muestra del uso del detector de harris sobre

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

vertical

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

horizontal

Figura 5.36: Máscara de convolución vertical y horizontal

imágenes diferentes se observa en la figura 5.37. La detección de puntos sobresalientes en ambas imágenes constituye el punto de partida sobre el cual el sistema se basa. A partir de aquí diferentes operaciones se realizan sobre el conjunto de puntos para calcular las diferentes magnitudes de interés que llevan a la consecución de los objetivos planteados anteriormente.

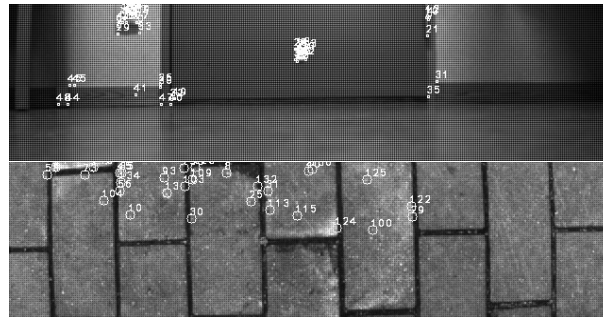


Figura 5.37: Puntos sobresalientes en la imagen usando el detector de Harris

5.5.3. Cómputo de la altura relativa del sistema

El cálculo de la altura se vale de un principio básico de disparidad estereoscópica. Dado un punto en el espacio cuya proyección sobre el plano

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

de cada imagen se conoce como r_1 y r_2 , la disparidad se define como la diferencia $r = r_2 - r_1$. Al conocerse la distancia que separa las cámaras se puede calcular la profundidad o distancia de la cámara al punto en el espacio mediante $D = \frac{fb}{r}$. La figura 5.38 muestra el principio de disparidad. Donde D es la distancia al punto en el espacio, f es la distancia focal y b la separación entre cámaras.

Antes de aplicar el concepto de disparidad se debe emparejar o correlar los puntos que pertenecen a ambas imágenes. Es decir, una vez se aplica el *detector de Harris* en ambas imágenes se obtienen dos conjuntos de puntos sobresalientes, el siguiente paso es encontrar aquellos puntos que pertenecen a ambas imágenes, en otras palabras los puntos en ambas imágenes que corresponden a la proyección sobre la imagen del mismo punto en el espacio.

La correlación cruzada es un método estándar de estimación del grado en el cual dos series están correladas. Esta técnica surge como opción adecuada para el emparejamiento de las características. En el caso del procesamiento de imágenes factores como la iluminación, texturas, cambios de fondo, etc son de suma importancia para la correlación. Diferentes análisis experimentales se han hecho [Martin and Crowley, 1995] de las técnicas de correlación cruzada. De la literatura consultada la técnica más adecuada a la tarea propuesta ha resultado el algoritmo de correlación normalizada de cruce por cero (ZNCC) el cual presenta ventajas como invarianza a cambios de iluminación y escala, sobre el resto. La correlación cruzada se define como

$$ZNCC(i, j) = \frac{\sum_{MN} (I_L - \bar{I}_L)(I_R - \bar{I}_R)}{\sqrt{\sum_{MN} (I_L - \bar{I}_L)^2 \sum_{MN} (I_R - \bar{I}_R)^2}} \quad (5.30)$$

La correlación se realiza sobre una ventana de tamaño $M \times N$, \bar{I}_R y \bar{I}_L son el promedio de niveles de gris de los píxeles en esa ventana, I_R y I_L son los valores de gris en esa ventana. El resultado de la correlación suele ser un valor el cual se umbraliza. Experimentalmente se halla que los valores por encima del 0.85 son considerados como la misma características. Adicional-

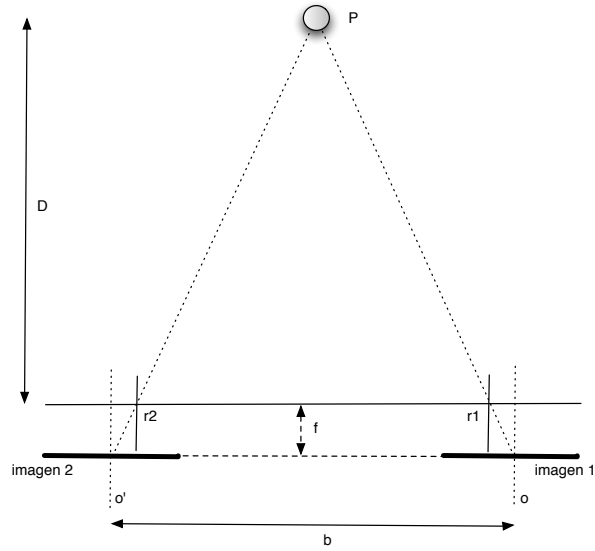


Figura 5.38: Principio de disparidad estereoscópica

mente, como criterio discriminador solo aquellos puntos que son correlados de izquierda a derecha, y de derecha a izquierda son escogidos como puntos sobresalientes.

Como resultado de esta etapa se consiguen dos conjuntos de puntos correlados entre si al cual se le calcula la disparidad para cada punto. La disparidad resultante es la media de la disparidad calculada para el conjunto.

Con este valor único de disparidad se aplica la ecuación siguiente:

$$D = \frac{fB}{r} \quad (5.31)$$

donde f es el valor de la distancia focal, B es la distancia entre las cámaras y r la disparidad.

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

Esta ecuación en la teoría debería arrojar resultados adecuados, sin embargo, en la practica los errores cometidos con esta ecuación son grandes, por lo que opta por la siguiente estrategia de calibración:

Colocando un objeto conocido sobre un fondo uniforme se mide la disparidad para diferentes distancias de la cámara. Como resultado se obtiene un conjunto de puntos del inverso de la distancia en función de la disparidad. A continuación se grafican los puntos y se halla la recta que mejor se ajusta a este conjunto de puntos

La gráfica siguiente (figura 5.39) muestra los valores del inverso de la distancia versus la disparidad, y la linea que se ajusta a los puntos. La ecuación de esta recta es:

$$r = 127,059 \frac{1}{D} - 2,95 \quad (5.32)$$

reagrupando los términos se puede escribir:

$$D = \frac{127,059}{r - 2,95} \quad (5.33)$$

Esta ecuación tiene similitud con la ecuación 5.31, pero incluye un factor de corrección en la disparidad que produce mejores resultados en la practica. Tomando datos de una calibración previa la distancia focal resulta en 600, y siendo la distancia entre cámaras de 0.2 mts, produce un factor fB en el denominador igual a 120. Valor que guarda relación con el valor encontrado en la gráfica 5.39.

5.5.4. Estimación de la velocidad y el desplazamiento del sistema

El movimiento de la cámara se encuentra al seguir los puntos salientes de la imagen en el instante $(t - 1)$ al instante (t) , y encontrando el despla-

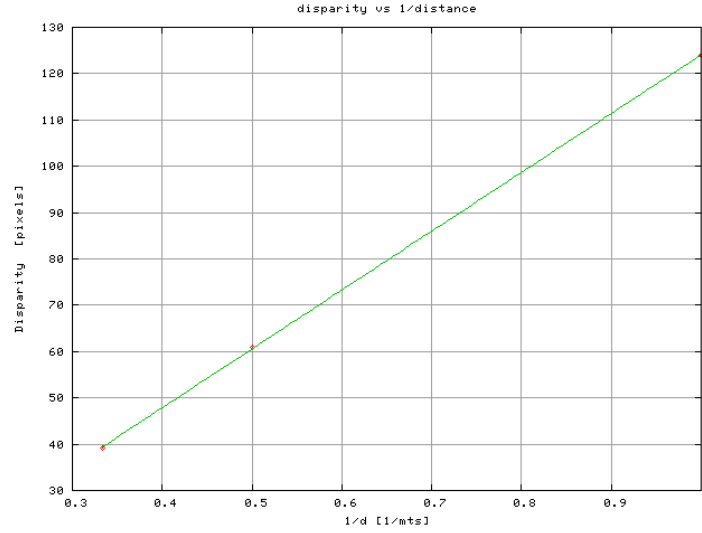


Figura 5.39: Gráfica para la calibración ajustando la línea al conjunto de puntos

miento y la rotación de estos puntos. Tomando dos conjuntos con el mismo numero de puntos del mismo objeto, en dos instantes de tiempo diferentes, los cuales han sido desplazados y rotados. Asumiendo que la correspondencia entre puntos es conocida, el problema se plantea como una optimización de mínimos cuadrados de la forma:

$$\min_{R,d} \sum_N \| TP_{t-1} - P_t \|^2 \quad (5.34)$$

donde P_{t-1} y P_t son los puntos 3D en el instante $(t - 1)$ y (t) , y N es el número de puntos. En cada iteración se generan puntos basándose en la distancia Euclídea entre ellos. La media de las distancias es usada como criterio para rechazar aquellos puntos incongruentes. T es la matriz de transformación constituida por una matriz de rotación R y un vector de traslación d de la forma

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Esta matriz de transformación se puede hallar usando diferentes métodos entre ellos, SVD⁷ [Arun et al., 1987], matrices orthonormales [Horn et al., 1988], cuaternios unitarios [Horn, 1987], doble cuaternios [Walker et al., 1991], etc. De la extensa literatura sobre el tema y distintos análisis experimentales que se han hecho sobre estas técnicas la descomposición de valores singulares (SVD) ha sido referenciada como la de mejor prestaciones globales [Eggert et al., 1997]. En resumen, para hallar la orientación y traslación de la cámara en el instante t se usa la información del instante $(t-1)$ (figura 5.40), esto permite hallar el movimiento instantáneo de la cámara de un frame a otro, en otras palabras, se dice que el sistema tiene memoria de un frame, ya que todas las magnitudes se calculan con respecto al frame anterior. Luego es posible hallar el movimiento con respecto al punto inicial integrando los valores en el tiempo.

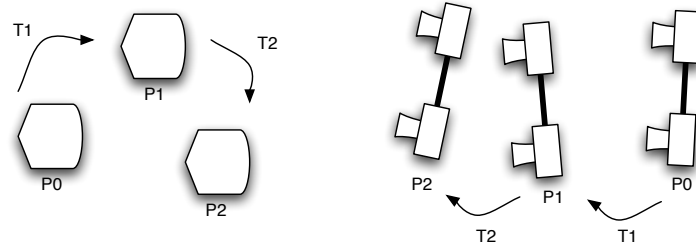


Figura 5.40: Valores son hallados con respecto al instante anterior. La matriz de transformación T que considera la rotación y traslación con respecto a la imagen previa.

Cuando la correspondencia entre puntos, la cual es todavía un campo abierto de investigación, no es conocida se deben usar previamente métodos adicionales para encontrar la correspondencia. El método implementado se

⁷SVD siglas inglesas de Singular Value Decomposition

basa en alinear los dos conjuntos de puntos salientes minimizando la distancia entre puntos vecinos iterativamente. El problema de la estimación de la correspondencia entre dos conjuntos de puntos de imágenes consecutivas se reduce a encontrar la minimización de la distancia Euclídea entre puntos. La técnica denominada iteración del punto cercano (ICP⁸) se ha usado ampliamente para hallar la correspondencia entre datos cuando se usa lasers. La técnica fue inicialmente propuesta por [Besl and McKay, 1992] para hallar la correspondencia entre los datos de un objeto digitalizado y un modelo geométrico, y ha sido desde entonces usada para reconstruir superficies 3D, localizar robots, etc. Sin embargo, en el área de la odometría visual ha sido relativamente poco usada [Nesnas et al., 2004], [Milella and Siegwart, 2006].

La técnica para la estimación en el desplazamiento usando ICP y SVD se puede resumir:

Asumimos dos conjuntos de puntos $P = \{p_i\}_i^{N_p}$ y $M = \{m_i\}_i^{N_m}$, con $N_p \neq N_m$. Definimos el punto más cercano como aquel que minimiza, $cp(p) = \arg \min_{m \in M} \|m - p\|$. Luego,

1. Calcular el subconjunto $y = \{m \in M \mid p \in P : m = cp(p)\}$
2. Calcular la transformación usando el método SVD tal que $(R, d) = \arg \min_{R, d} \sum_{i=1}^{N_p} \|y_i - Rp_i - d\|^2$
3. Aplicar la transformación $P \leftarrow RP + d$
4. Si el criterio de terminación se satisface, terminar, si no, ir al paso 1. Los criterios de terminación son: a) Si el error cuadrático medio de las distancias es menor al 5 %, b) si el número máximo de iteraciones se alcanza.

Para resolver el paso 2 usando el método SVD se procede:

⁸ICP siglas inglesas de Iterative Closest Point

Calculo de la rotación: Con los dos conjuntos de puntos $y = \{y_i\}_i^{N_p}$ y $P = \{p_i\}_i^{N_p}$, se halla el centroide del conjunto como

$$y_{c_i} = y_i - \bar{y} \quad (5.36)$$

$$p_{c_i} = p_i - \bar{p} \quad (5.37)$$

donde \bar{y} y \bar{p} vienen dados por

$$\bar{y} = \frac{1}{N_p} \sum_{N_p} cp(p_i) \quad (5.38)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{N_p} \sum_{N_p} p_i \quad (5.39)$$

La minimización será entonces aquella

$$\min_R \sum_{N_p} \| y_{c_i} - Rp_{c_i} \|^2 \quad (5.40)$$

La ecuación 5.40 tiene un mínimo cuando la *traza*(RK) es máxima, es decir, cuando $K = \sum_{N_p} y_{c_i} p_{c_i}^T$. K se puede calcular usando SVD como $K = VDU^T$, luego la rotación óptima que maximiza la traza será $R = VU^T$.

Calculo de la traslación: Una vez se halla la rotación, la traslación se reduce a resolver la ecuación

$$d = \bar{y} - R\bar{p} \quad (5.41)$$

5.5.5. Validación experimental

Las pruebas experimentales mostradas a continuación han sido realizadas en dos fases. La primera fase ha consistido en usar un robot terrestre Pioneer [ActivMedia, 2006] dotado de un sistema estéreo para validar las

dos funcionalidades del algoritmo, como son estimación de altura y estimación del desplazamiento. Las configuraciones son las siguientes:

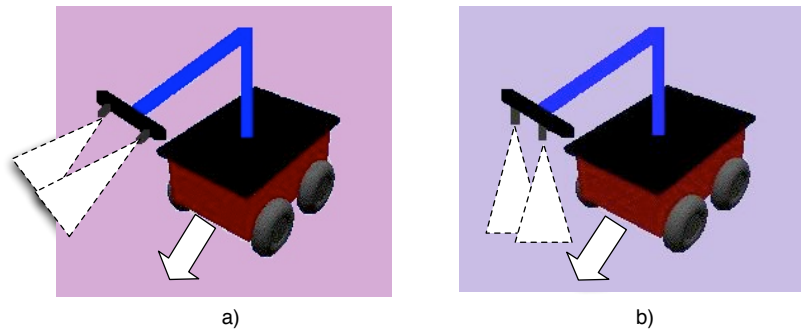


Figura 5.41: Dos configuraciones de cámara para validar las dos funcionalidades. a) cámara mira al frente. b) cámara mira hacia abajo

- Cámara mira hacia abajo perpendicular al suelo o plano de movimiento del robot para sensar el desplazamiento y orientación. figura 5.41(b).
- Cámara mira hacia el frente perpendicular al plano que contiene la características y paralelo al plano de movimiento del robot para sensar profundidad o distancia al plano. figura 5.41(a).

Las dos configuraciones de cámaras sobre el robot terrestre pionner AT3 pueden verse en la figura 5.42

La segunda fase se ha probado en un helicóptero autónomo. El sistema estéreo se ha colocado sobre una plataforma pan/tilt colocada al frente del helicóptero y mirando hacia abajo, con el objeto de estimar altitud y desplazamiento simultáneamente, como puede verse en la figura 5.43. A continuación se muestran los resultados más significativos de ambas pruebas.

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

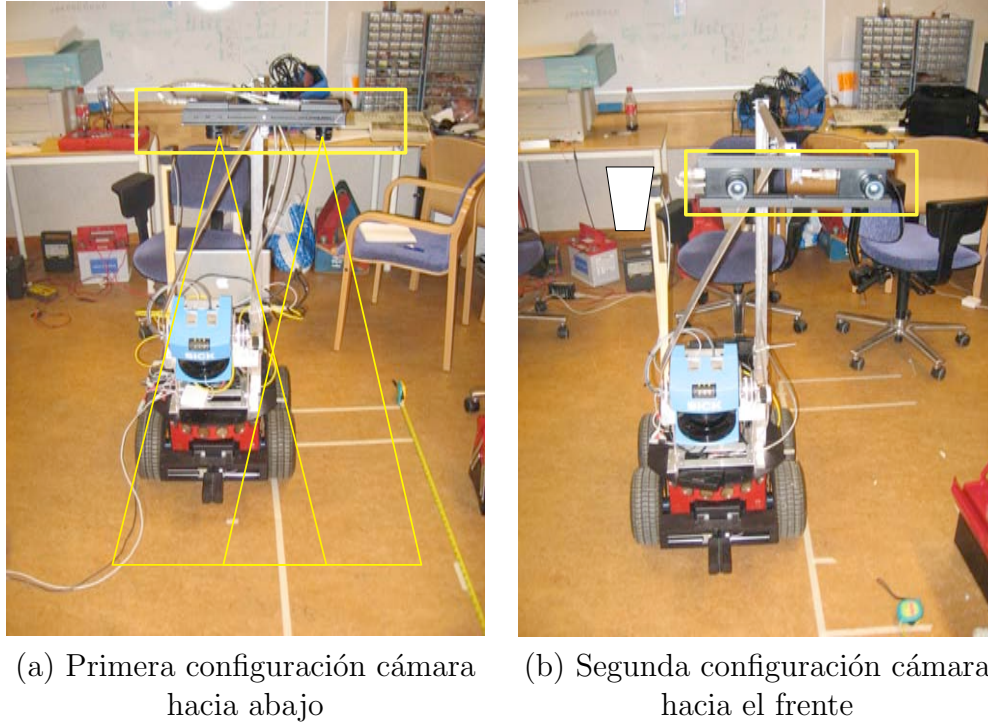


Figura 5.42: Configuraciones de la cámara sobre el robot terrestre

5.5.5.1. Pruebas sobre la plataforma terrestre

Las pruebas experimentales se han llevado a cabo tanto en un entorno interior como exterior, lo que ha permitido validar la aplicación en dos condiciones distintas. Las pruebas contemplan calculo de la odometría y la distancia, bien sea, en lazo abierto o en lazo cerrado con el control del robot. Las figuras 5.44 y 5.45 muestran tres pruebas en interior donde el robot se comanda en lazo abierto a realizar un circuito mientras se estima el desplazamiento por visión. Se hace correlación con diferentes medidas, el desplazamiento comandado, el desplazamiento medido y el desplazamiento estimado. De las gráficas se puede observar que, aunque existe una diferencia significativa entre las distancias medidas y estimadas con relación a la

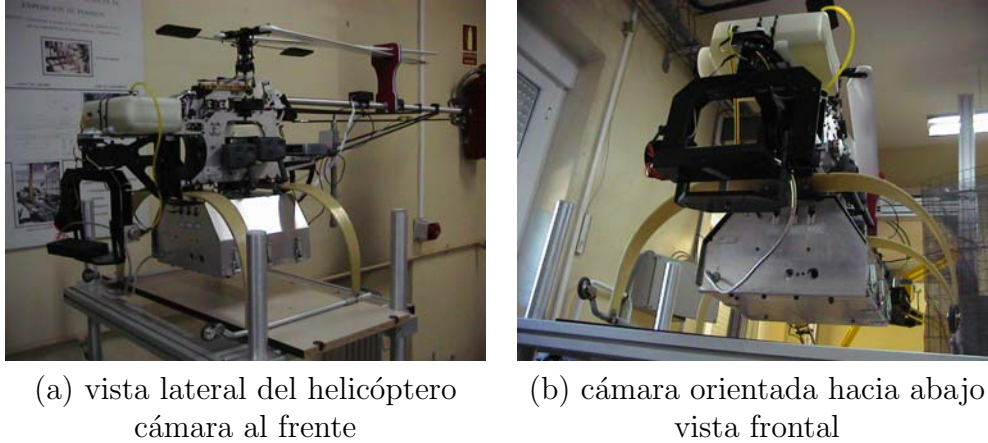


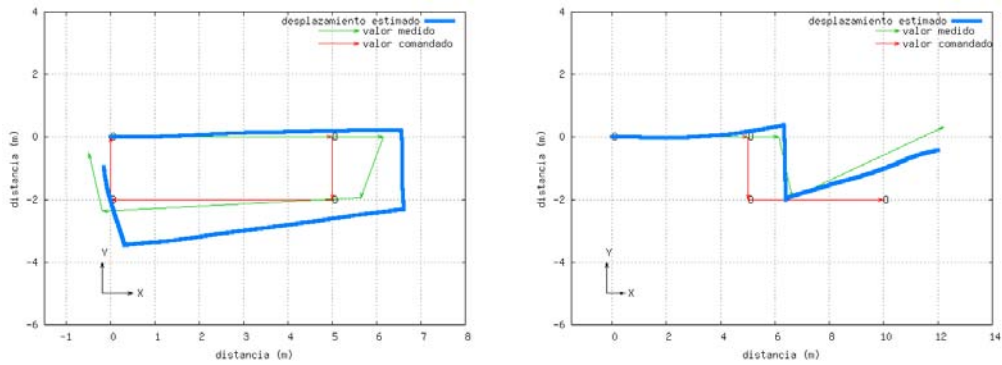
Figura 5.43: Configuración de la cámara sobre la plataforma aérea. Cámara colocada al frente de la plataforma

comandada, es importante hacer notar la correspondencia entre las medidas del desplazamiento real del robot y la estimación hecha por visión.

La evolución en la estimación de altura mostrada en la figura 5.45(b) presenta estabilidad, y mantiene su valor a lo largo de las pruebas. Existen puntos de incertidumbre en la estimación debida principalmente a las vibraciones, que provocan instantes donde la cámara deja de mantener ortogonal su eje óptico con el plano donde se encuentran los puntos salientes. A su vez, esto hace que la estimación tienda a un valor mayor, ya que el vector que une el eje óptico de la cámara no es perpendicular al suelo, sino que tiene un ángulo dado, y al no ser posible medir este ángulo se hace difícil la corrección de la altura. Este fenómeno se puede corregir al poseer sensores que midan los ángulos de actitud del sistema que aloja las cámaras.

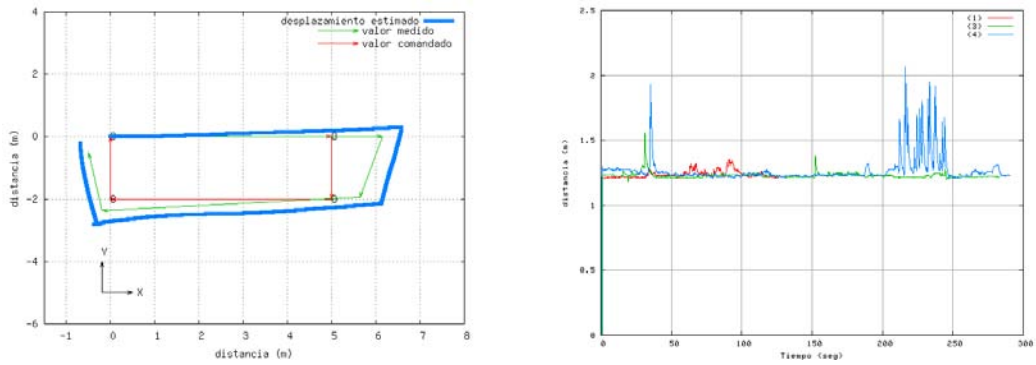
En las figuras 5.44(a) y 5.44(b), y figura 5.45(a) se muestra el resultado de la estimación de la odometría visual. Dichos experimentos se han correlado con medidas cualitativas y sirven para estimar el grado de desempeño que el algoritmo posee en un entorno donde no existen marcas conocidas

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo



(a) Resultado en un circuito cerrado (b) Resultado en un circuito abierto

Figura 5.44: Experimentos sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Figura a) muestra un circuito cerrado y figura b) muestra un circuito abierto



(a) Resultado en un circuito cerrado (b) Evolución en la estimación de altura

Figura 5.45: Experimentos sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Figura a) muestra un circuito cerrado y figura b) muestra la evolución de la altura durante las pruebas

sobre el suelo. Adicionalmente, ha permitido encontrar el grado de influencia que tienen las vibraciones en la estimación de la altitud. Experimentos posteriores donde se usan medidas referenciales externas, como GPS, encoders, etc, permiten conocer en forma cuantitativa los errores involucrados en las estimaciones.

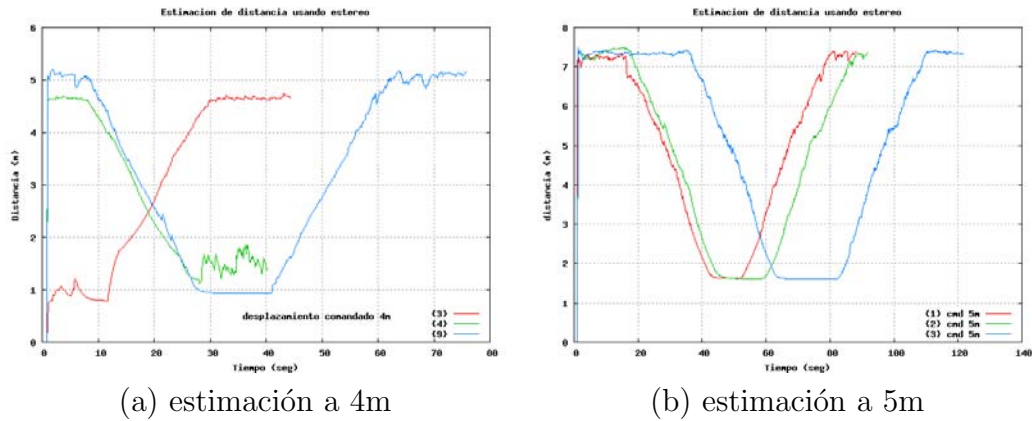


Figura 5.46: Experimentos en interior sobre estimación de la distancia o profundidad del sistema estéreo al plano que contiene las características salientes.

Con relación al calculo de la distancia usando estereoscopia, las medidas mostradas en las gráficas 5.46 y figura 5.47 corresponden a diferentes experimentos realizados dentro y fuera del laboratorio. Como se mencionó anteriormente, la influencia de las vibraciones se pone de manifiesto en la estimación hecha, gráfica 5.47. Al compararse con la gráfica 5.46, se observa periodos de incertidumbre donde el grado de vibración y orientación instantánea de las cámaras puede decirse afecta proporcionalmete a la estimación. Un aislamiento más adecuado y una medida sobre los ángulos de actitud de la cámara permiten usar técnicas para corregir esta incertidumbre.

Experimentos sobre odometría en espacios exteriores permiten usar otros

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

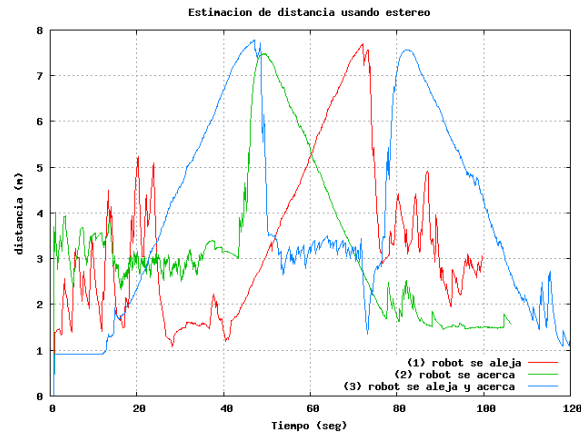


Figura 5.47: Experimentos en exterior sobre estimación de la distancia o profundidad del sistema estéreo al plano que contiene las características salientes. Estimación a 7m.

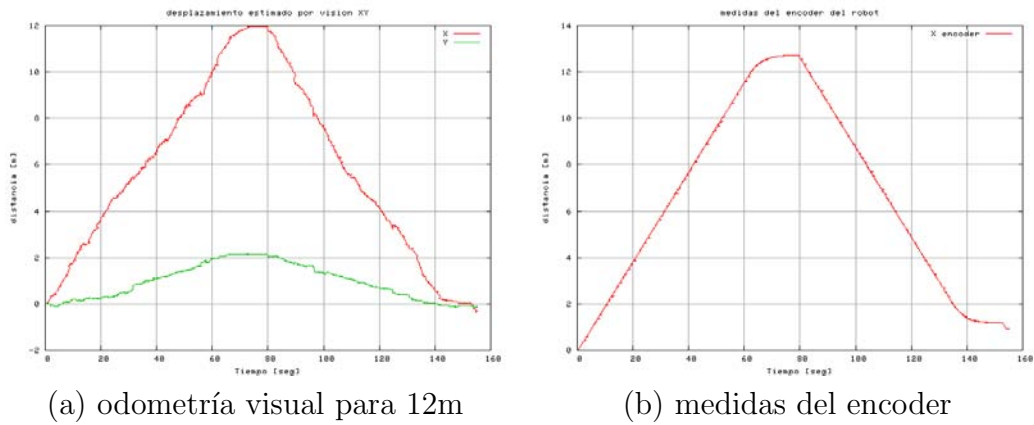


Figura 5.48: Experimentos en exterior sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Estimación para 12m en desplazamiento

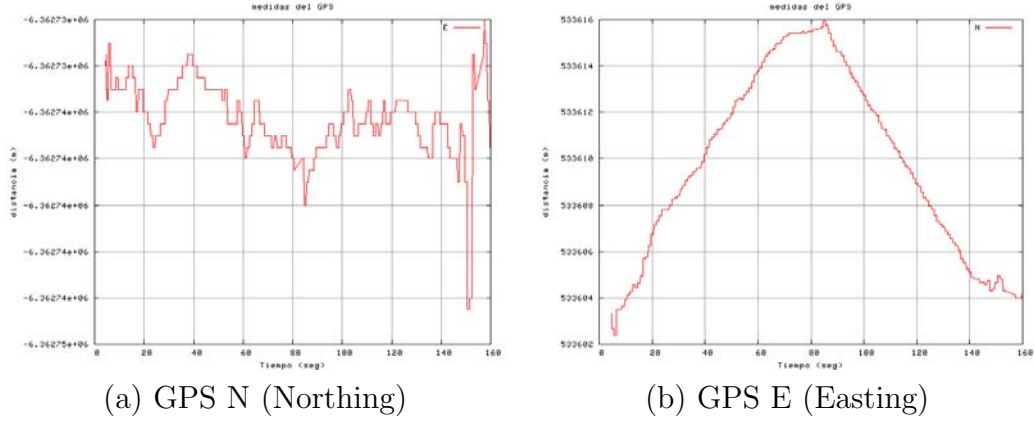


Figura 5.49: Experimentos en exterior sobre estimación de desplazamiento. Medidas referenciales externas GPS.

sistemas externos de referencias que permiten estimar el error en el desempeño del sistema. Las figuras (5.48), (5.49) y (5.50), recogen las señales involucradas para un desplazamiento longitudinal de 12 metros. La gráfica 5.48(a) muestra la estimación en el desplazamiento, hecha por el sistema de visión durante la prueba. La gráfica 5.49 muestra las medidas del GPS para esta prueba y la gráfica 5.48(b) las lecturas tomadas del encoder del robot. Con respecto al desplazamiento, ya que el robot no puede desplazarse lateralmente, pero sí mientras se desplaza longitudinalmente, la gráfica 5.50 muestra la estimación visual de velocidad y el desplazamiento en XY.

De las gráficas anteriores se pueden calcular dos parámetros que sirven como medida de calidad del sistema para esta prueba. El error cuadrático medio entre la estimación visual y el GPS (ECM_G^V), y el error cuadrático medio entre la estimación visual y el encoder (ECM_E^V). Dichos valores se muestran en la gráfica 5.51. Los valores de ECM_E^V muestran un desempeño aceptable donde el error se mantiene acotado, sin embargo el ECM_G^V muestra valores de hasta 1.5m, y un valor medio aproximado de 84 cm, esto es esperable ya que la resolución mínima del GPS es de 50 cm, y no es capaz

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

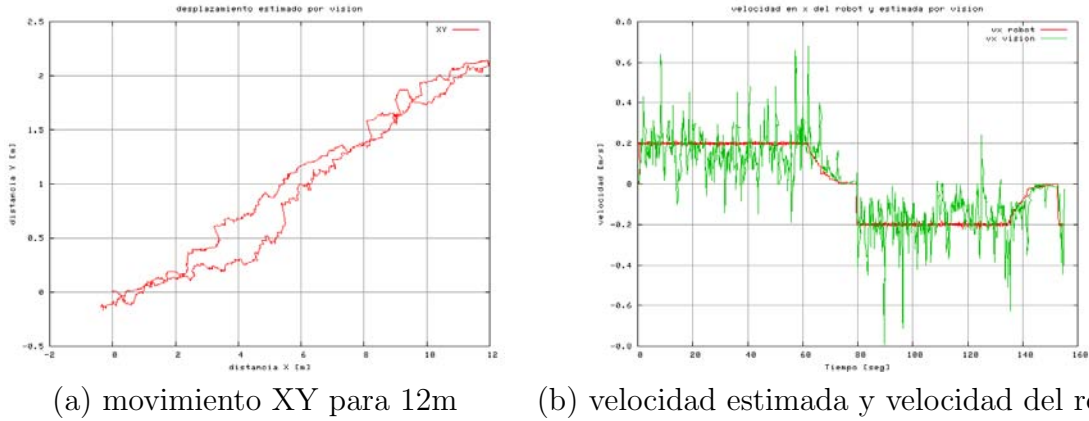


Figura 5.50: Experimentos en exterior sobre estimación del desplazamiento del robot usando visión. Estimación para 12m en desplazamiento

de medir cambios en localización menores a este valor. Tomando en consideración que para un desplazamiento de 12m el error medio cometido es del 7.83 %, este valor puede ser reducido aún más, si esta información se fusiona con las medidas inerciales, con lo que se logra sobrellevar la incertidumbre que posea el sistema de visión cuando no existan características sobresalientes en la imagen que puedan ser seguidas.

Como paso siguiente, una vez se tiene una medida de fiabilidad del sistema visual, es comprobar el desempeño del sistema en lazo cerrado con el control del robot. La gráfica 5.52(a) muestra el desplazamiento longitudinal y lateral del robot cuando se comanda un movimiento de 3m hacia adelante y luego hacia atrás, en lazo cerrado con el sistema visual. La gráfica 5.52(b) muestra las velocidades del robot, respectivamente durante la prueba, la cual se realizó en un entorno interior.

La gráfica 5.52(a) se puede desglosar en dos, el movimiento longitudinal y el movimiento lateral que el sistema de visión esta estimando durante esta

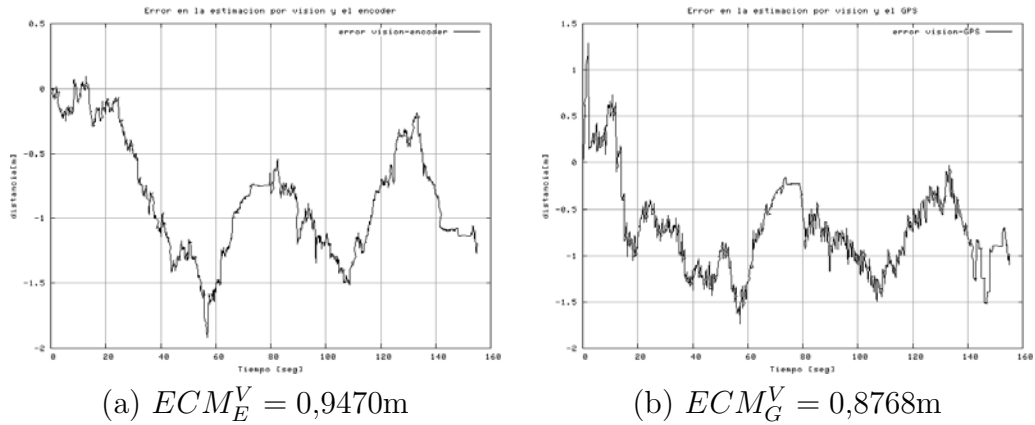


Figura 5.51: Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del encoder del robot y las medidas del GPS.

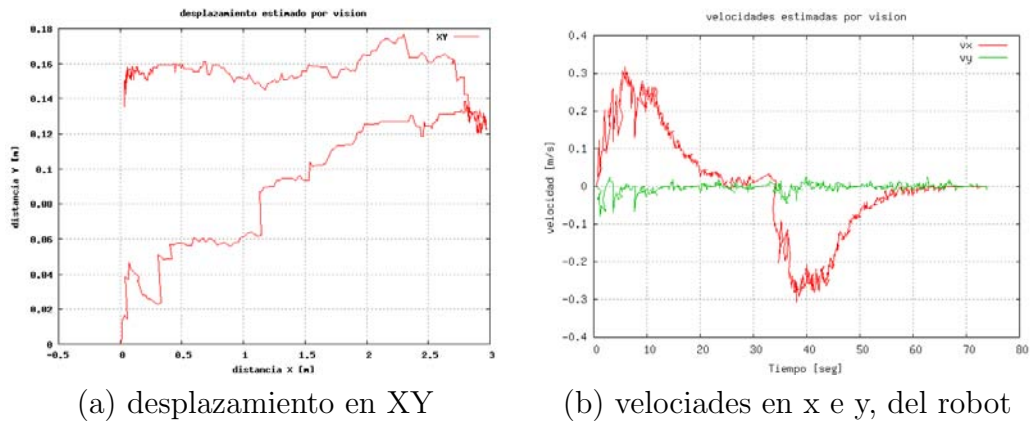


Figura 5.52: Estimación del movimiento y la velocidad del robot hecha por la odometría visual en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

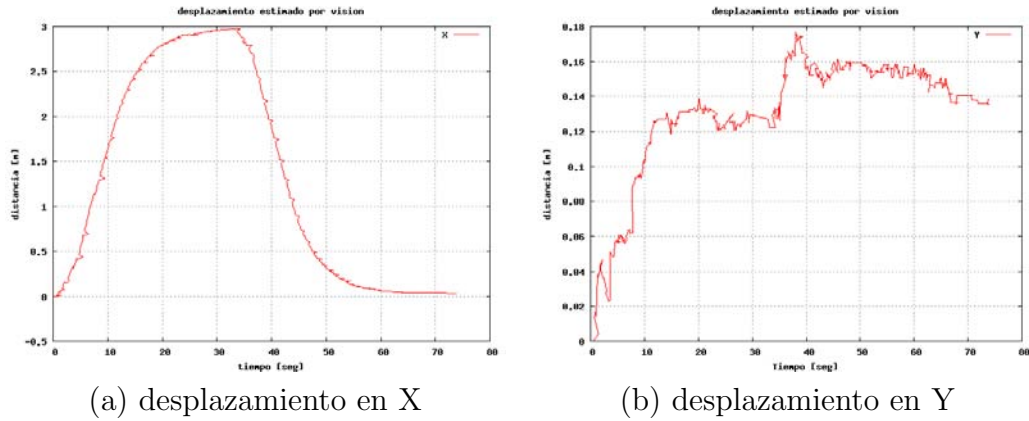


Figura 5.53: Desplazamiento en X e Y estimado por la odometría visual en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.

prueba, ver gráfica 5.53. Adicionalmente, se pueden correlar las referencias que el sistema de visión esta calculando con las magnitudes del robot. Por ejemplo, la gráfica 5.54(a) muestra la relación entre la estimación hecha por visión y las medidas del encoder. La gráfica 5.54(b) muestra la medición de la velocidad del robot y la estimación que el sistema visión realiza.

A pesar de que no se cuenta con una medición cuantitativa del desempeño del sistema para la siguiente prueba, se observa en las gráficas que la estimación hecha por visión mantiene a lo largo de la prueba, un valor consecuente con las mediciones del robot y la definición de la tarea, la cual es un desplazamiento de 3 metros.

Las pruebas experimentales mostradas con anterioridad han permitido observar el desempeño y funcionamiento del sistema, probando ambas funcionalidades sobre un robot terrestre. Las pruebas han buscado reproducir las condiciones para las cuales el sistema esta dirigido. Tanto odometría visual, como estimación de distancia usando estereoscopia se han probado y verificado antes de pasar a la experimentación sobre la plataforma aérea.

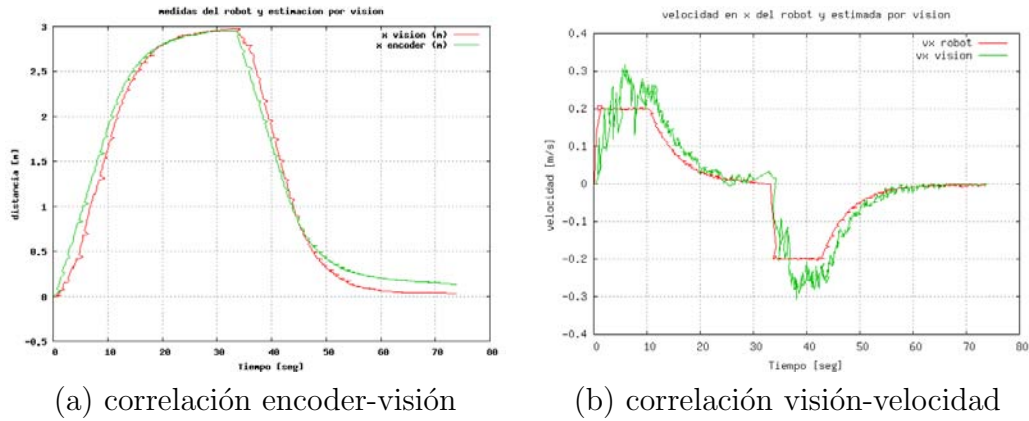


Figura 5.54: Relación entre la odometría visual y las mediciones del robot en lazo cerrado para un desplazamiento de 3m.

El próximo conjunto de pruebas validan el sistema sobre un helicóptero autónomo en lazo abierto, correlando las variables del estado del helicóptero con las estimaciones del sistema visual.

5.5.5.2. Pruebas sobre la plataforma aérea: un helicóptero autónomo

El siguiente conjunto de pruebas experimentales se han llevado a cabo sobre un helicóptero autónomo [COLIBRI, 2005]. Diferentes vuelos experimentales se han realizado para validar las funcionalidades del desarrollo, usando las medidas inerciales del helicóptero para aumentar la robustez del sistema visual. Las figuras (5.55), (5.56), (5.57) y (5.58) muestran los resultados más significativos de cuatro de las pruebas experimentales. Dichas gráficas muestran la correlación entre la estimación que realiza el sistema visual y el estado del helicóptero, en cuanto al desplazamiento longitudinal, lateral, vertical y orientación relativa. Cada medida efectuada por el sistema de visión se ha cotejado con su equivalente calculado por el estimador de estado del helicóptero. Para conocer el grado de correspondencia entre las

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

medidas de ambos sistema y la calidad de la estimación hecha por el sistema visual, se ha usado el *error cuadrático medio*. Cuatro medidas se extraen de las mediciones: ECM_N^V el error cuadrático medio en la estimación del desplazamiento longitudinal, ECM_E^V el error cuadrático medio en la estimación del desplazamiento lateral, ECM_H^V el error cuadrático medio en la estimación de la altura y ECM_ψ^V el error cuadrático medio en la estimación de la orientación relativa. El cuadro 5.2 recoge los valores calculados para las pruebas experimentales realizadas. Las figuras (5.59), (5.60), (5.61) y (5.62) muestran los valores del error absoluto a lo largo de cada una de las pruebas.

Es de notar que en las pruebas el desplazamiento longitudinal siempre se realiza en dirección norte (UTM-Northing), el desplazamiento lateral en dirección este (UTM-Easting), lo cual no es cierto en todos los casos. Por esta razón los errores y variables asociadas al desplazamiento longitudinal se diferencian con la letra N, y de manera similar, lateral con la letra E.

Cualitativamente, las gráficas (5.55), (5.56), (5.57) y (5.58) muestran una correspondencia clara en la evolución de las estimaciones visuales y el estado actual del helicóptero. Sin embargo, en términos cuantitativos los errores calculados muestran el desempeño del sistema cuando por ejemplo, el helicóptero alcanza los 8 metros de altitud, lo cual se pone de manifiesto en la degradación en la estimación del desplazamiento y la orientación del helicóptero. Valores que se muestran en la segunda fila del cuadro 5.2 (prueba 3). Las pruebas 3 y 7, se realizaron a alturas similares mostrando desempeños diferentes, lo que puede estar causado por la falta de características visuales en la imagen entre una prueba y otra, ya que la tendencia en el error muestra que la precisión aumenta cuando el helicóptero vuela a baja altura, lo cual es esperable ya que las características se muestran con más definición y su número aumenta.

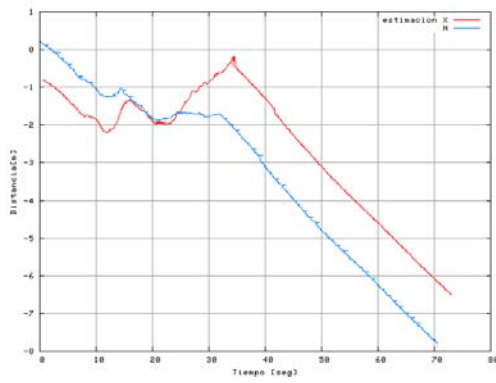
Cuadro 5.2: Errores cuadráticos medios en las estimaciones por visión y el estado del helicóptero

Prueba	ECM_N^V m	ECM_E^V m	ECM_ψ^V grados	ECM_H^V m
2	1.0910	0.4712	1.7363	0.1729
3	6.2768	1.8895	8.9712	1.0677
7	1.3924	1.0593	3.3288	1.0791
10	0.8531	1.3739	3.0524	0.5077

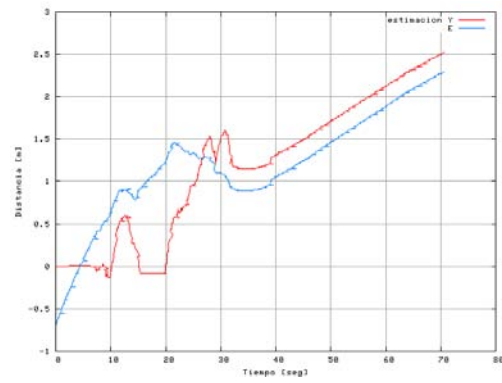
De las pruebas y resultados obtenidos se pueden extraer los siguientes comentarios:

- La estimación de altura mediante estereoscopía muestra mayor robustez dentro de los límites del diseño. Pese a que el error entre las pruebas 3 y 7 presentan grandes diferencias, el error en la estimación de la altura es similar. De las cuatro pruebas el ECM_H^V se mantuvo acotado entre un (13-16) % del valor máximo en altitud.
- La estimación del desplazamiento es altamente dependiente del número de características visualmente seguidas. El algoritmo ICP muestra principalmente dos carencias que se han puesto de manifiesto en las pruebas, incapacidad de manejar grandes desplazamientos visuales, e incapacidad de manejar incongruencias en la correspondencia, es decir, las no correspondencias.
- Las diferencias en los resultados obtenidos de las pruebas sobre las dos plataformas distintas vienen marcadas por los diferentes factores que limitan o influyen sobre ambas plataformas, como por ejemplo la baja velocidad del robot móvil hace mejor la estimación visual, las vibraciones y la velocidad mayor del helicóptero hacen más difícil las estimaciones aumentando la magnitud de los errores.

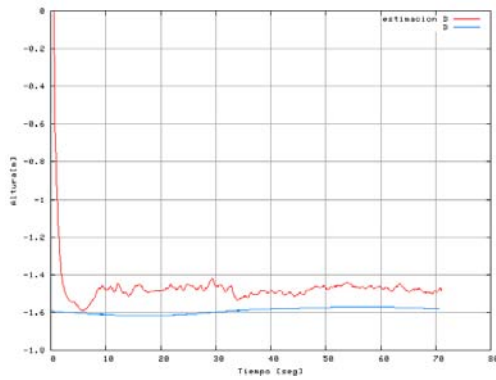
5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo



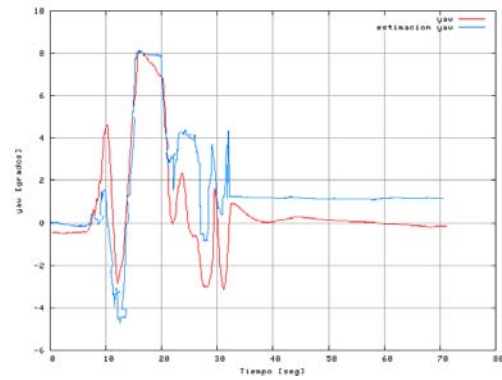
(a) desplazamiento N y estimación visual en X



(b) desplazamiento E y estimación visual en Y

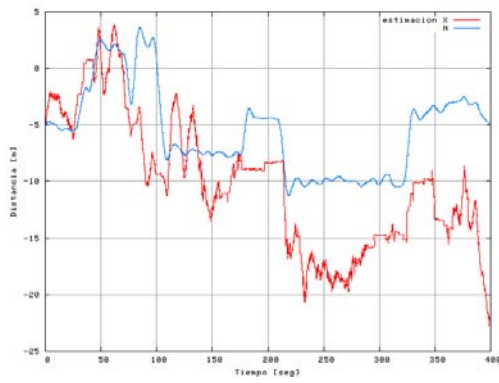


(c) altura del helicóptero D y estimación visual de altura

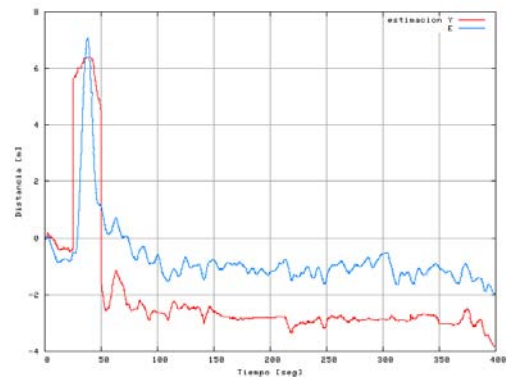


(d) orientación yaw y estimación visual en yaw

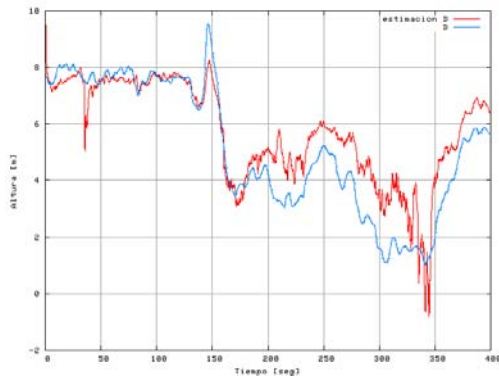
Figura 5.55: Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, segunda prueba



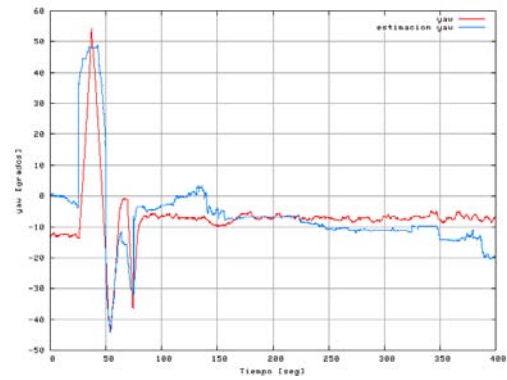
(a) desplazamiento N y
estimación visual en X



(b) desplazamiento E y
estimación visual en Y



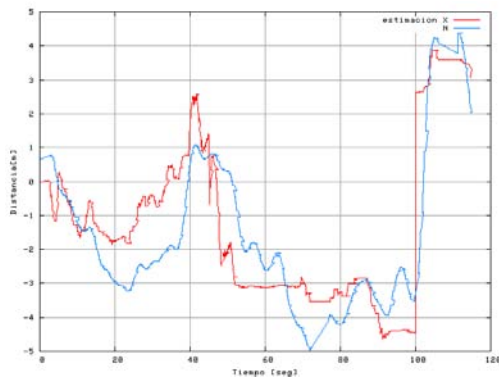
(c) altura del helicóptero D y
estimación visual de altura



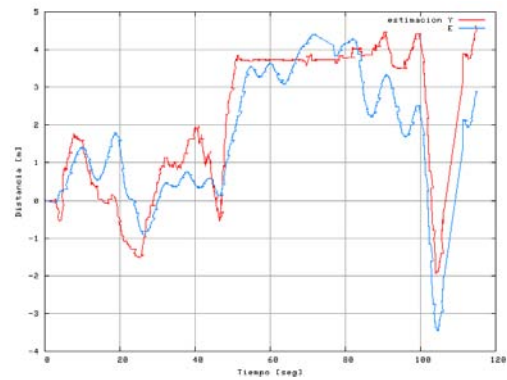
(d) orientación yaw y
estimación visual en yaw

Figura 5.56: Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, tercera prueba

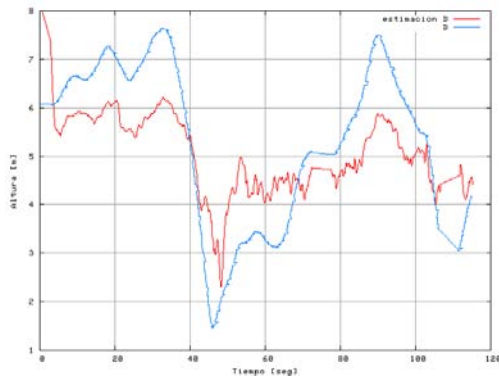
5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo



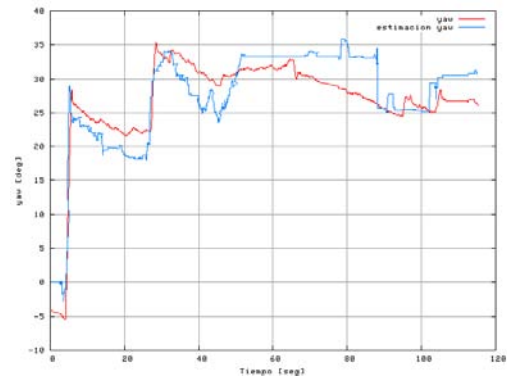
(a) desplazamiento N y estimación visual en X



(b) desplazamiento E y estimación visual en Y

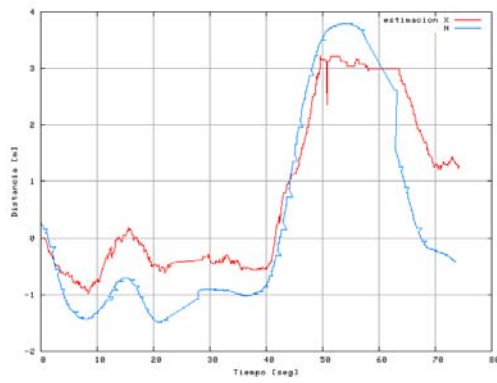


(c) altura del helicóptero D y estimación visual de altura

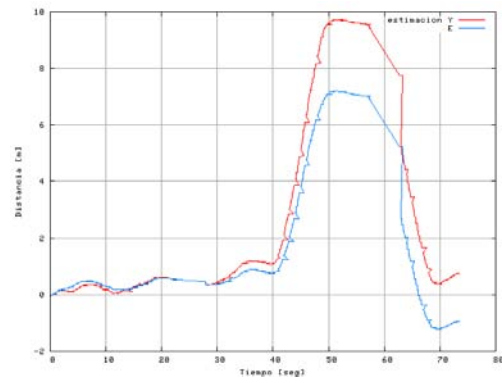


(d) orientación yaw y estimación visual en yaw

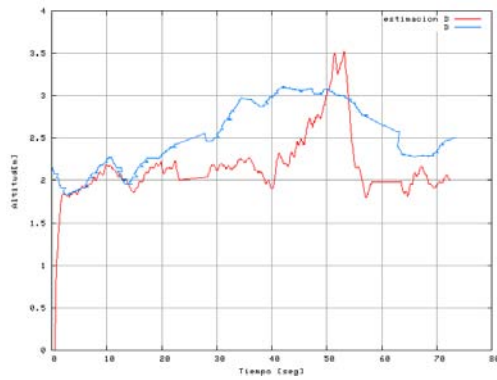
Figura 5.57: Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, séptima prueba



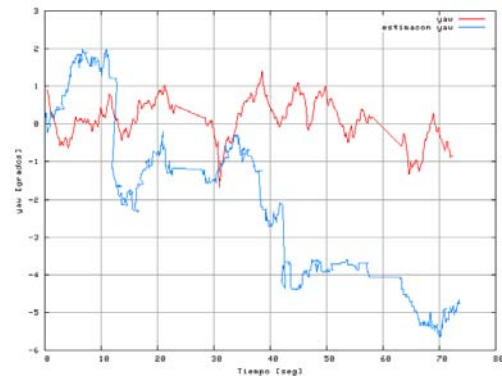
(a) desplazamiento N y estimación visual en X



(b) desplazamiento E y estimación visual en Y



(c) altura del helicóptero D y estimación visual de altura



(d) orientación yaw y estimación visual en yaw

Figura 5.58: Correlación entre la odometría visual y el estado del helicóptero durante prueba experimental, décima prueba

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

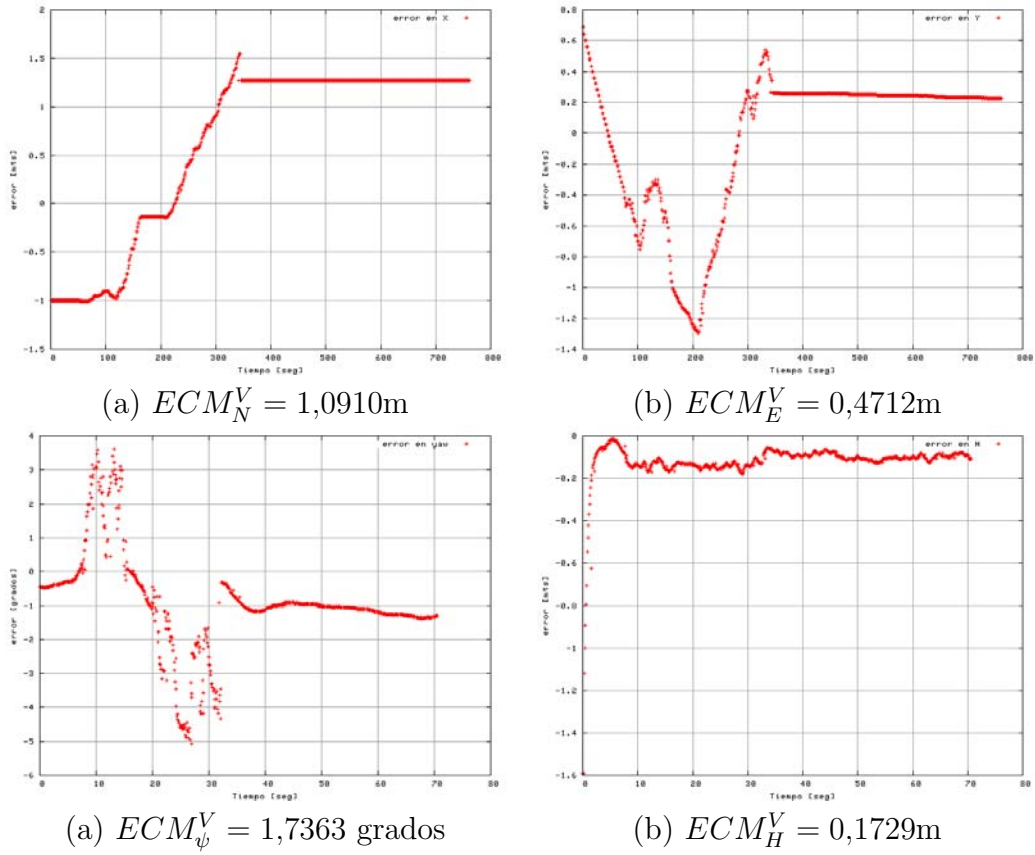


Figura 5.59: Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, segunda prueba.

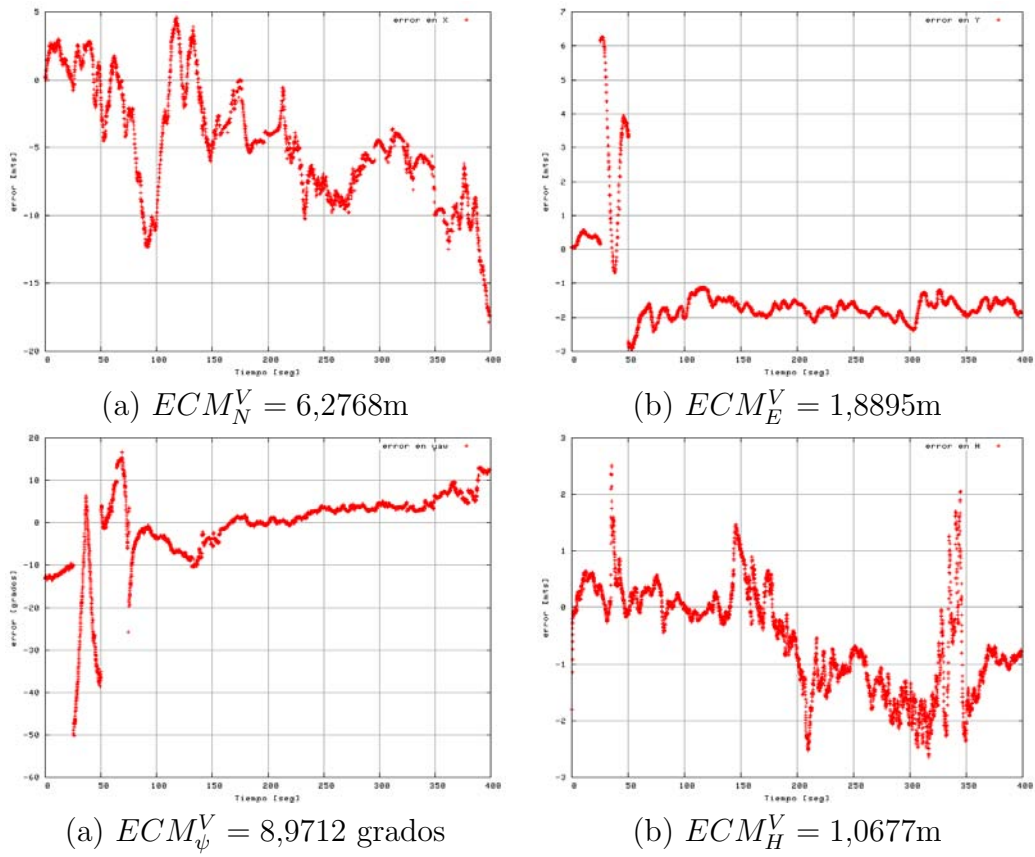


Figura 5.60: Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, tercera prueba.

5.5. Visión estereoscópica para la navegación de un vehículo aéreo autónomo

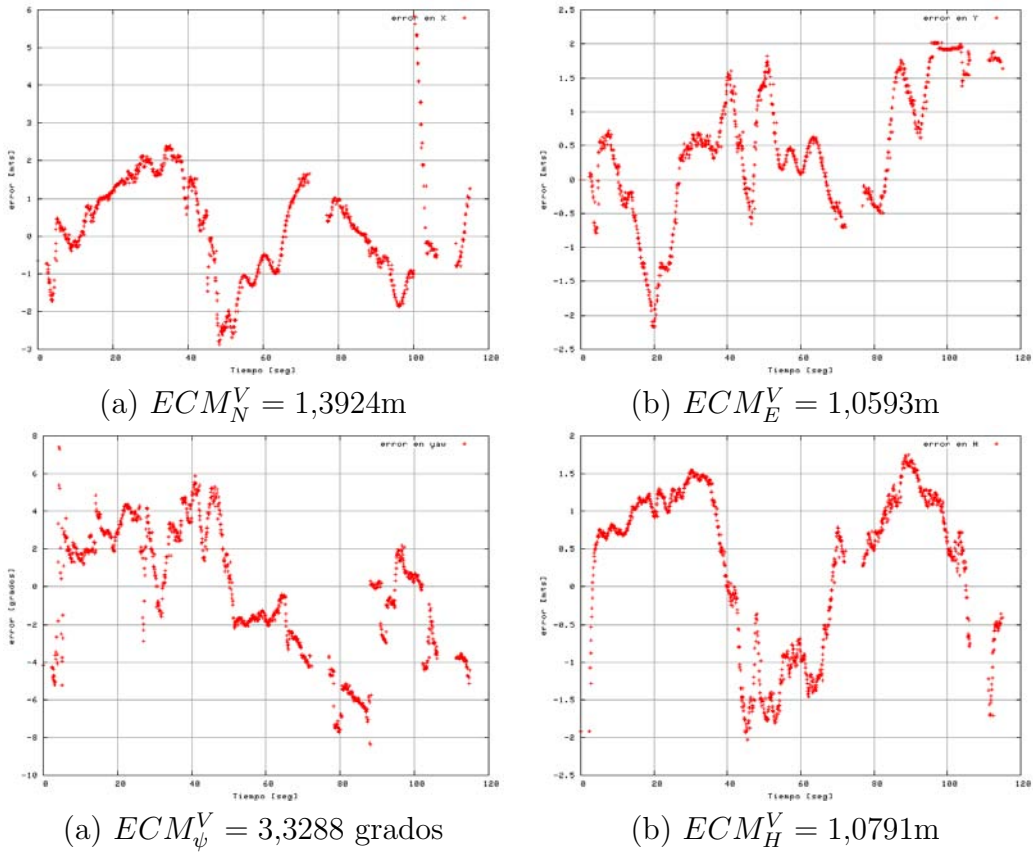


Figura 5.61: Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, séptima prueba.

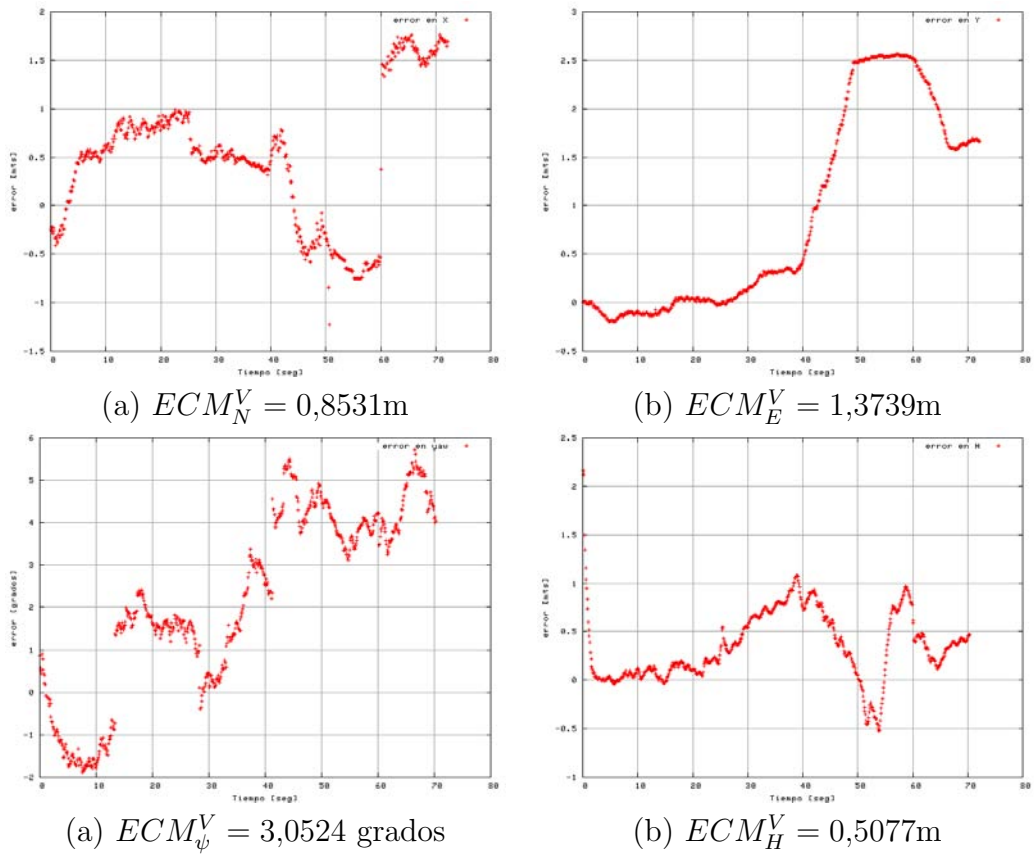


Figura 5.62: Errores en las estimaciones hechas por visión con relación a las medidas del estado del helicóptero, décima prueba.

5.5.6. Discución

El presente desarrollo ha demostrado experimentalmente un sistema para la estimación del desplazamiento y la altura de un UAV. La funcionalidad del sistema se ha probado en dos fases usando dos diferentes plataformas, una terrestre o robot móvil y un helicóptero autónomo. De ambos conjuntos de pruebas se han podido extraer medidas cuantitativas y cualitativas sobre el desempeño general del sistema. En el caso de las pruebas realizadas con el helicóptero se ha podido validar la corrección hecha al incluir los ángulos de actitud del helicóptero en la estimación de la altitud. Esto permite compensar los instantes en donde el eje óptico de la cámara deja de ser perpendicular al plano que contiene las características salientes. Adicionalmente, el algoritmo ha probado ser consistente funcionando en entornos diferentes con condiciones ambientales distintas. La frecuencia de funcionamiento del sistema es de 8 Hz procesando imágenes de 640x480 pixeles, aunque lejos del tiempo real, permite un desempeño aceptable. Usando estrategias como reducción en la resolución de las imágenes y fusión con las medidas inerciales esta frecuencia puede aumentarse.

Las medidas del sistema, una vez se validen extensivamente se pueden fusionar con las medidas de la IMU y otros sensores para así tener una estimación de estado más fiable ante situaciones de poca recepción o fallo en el GPS. De igual forma, se usan las medidas de la IMU para aumentar la robustez del sistema visual, y para sobrellevar las posibles incertidumbres que posea el sistema cuando no hayan características visuales sobresalientes en la escena.

5.6. Conclusiones

En este capítulo se han presentado varios trabajos realizados con la finalidad de experimentar la propuesta de control visual presentada en el capítulo 3, de igual manera, su integración con un control de bajo nivel a

través de una capa de interconexión. Esta capa ha sido diseñada para el uso con un helicóptero autónomo, no obstante se ha extrapolado su uso a trabajos donde la plataforma a controlar no es un vehículo de estas características, como el caso de los desarrollos expuestos en las secciones 5.4 y 5.5.

Los desarrollos presentados han estado orientados a problemas específicos. Un sistema visual que puede ser empleado en aplicaciones de inspección de líneas eléctricas se presentó en la sección 5.2 y cuya propuesta puede ser integrada con el planteamiento de control visual descrito en el capítulo 3. Un algoritmo de detección y seguimiento de características en entornos urbanos presentado en la sección 5.3 sirvió de medio para la validación de la propuesta de control visual lateral y vertical. Adicionalmente, un mecanismo de seguridad basado en visión por computador para un UAV en caso de emergencia se describió en la sección 5.4, y finalmente, un sistema visual para asistir la navegación de un UAV en entornos donde la recepción de algunos sensores (como el GPS) es limitada se expuso en la sección 5.5. Cada planteamiento de control visual para un UAV propuesto, se ha validado experimentalmente en diferentes situaciones y diferentes plataformas. A partir de los resultados obtenidos, se ha concluido acerca de los factores influyentes en toda aplicación visual orientada a controlar un UAV, los aspectos más destacados de cada aplicación se han discutido, mostrando sus bondades y puntos donde se deben realizar mejoras.

A pesar del hecho de que cada aplicación se ha originado para resolver una problemática distinta, éstas pueden ser integradas en un esquema general dando lugar a un sistema de procesamiento visual para un vehículo autónomo aéreo que responda ante diferentes necesidades en un ámbito de aplicación experimental.

Capítulo 6

Conclusiones y futuros desarrollos

En este capítulo se exponen las conclusiones acerca del trabajo realizado, y descrito a lo largo del documento. En la presente tesis se han abordado estrategias de control visual y técnicas de procesamiento de imágenes para el control servo visual de robots aéreos. Estas conclusiones aluden tanto a aspectos generales del trabajo desarrollado y de los tópicos tratados, como a aspectos concretos de los algoritmos propuestos y su aplicación a los problemas que han sido objeto de estudio. Asimismo se proponen una serie de trabajos que se consideran de interés para el futuro.

6.1. Conclusiones

El tema del control y la navegación visual de vehículos aéreos autónomos ha suscitado un importante interés durante los últimos años y sigue motivando en la actualidad la actividad investigadora de una numerosa

comunidad científica. Gran parte de esta actividad se ha centrado en el área de control, se han propuesto y desarrollado técnicas para estabilizar y maniobrar helicópteros autónomamente dada una trayectoria de vuelo. Sin embargo el área de control visual de UAV esta en pleno auge y desde años recientes se viene popularizando el uso de vehículos aéreos no tripulados para inspección, monitoreo y vigilancia visual, lo que a su vez ha llevado a los investigadores del área visión por computador ha desarrollar técnicas que, usando la información que el vehículo adquiere a través de sensores visuales, pueda influir sobre la trayectoria o plan de vuelo acorde con el procesamiento visual de la escena. Es en este campo donde la presente tesis doctoral se ha centrado aportando conceptos y planteamientos acerca del control visual para vehículos aéreos autónomos, haciendo aportaciones como:

1. **Arquitectura de control de vuelo para su integración con la información visual:** donde se ha diseñado una arquitectura de control de vuelo que se integra con sistemas referenciales externos a través de una arquitectura cliente-servidor usando mensajes TCP/UDP. Las leyes de control que rigen el controlador de vuelo se basan en controladores PID, los cuales han sido validados empíricamente y cuyos resultados fueron descritos en el capítulo 4.
2. **Arquitectura de software de propósito general para el control visual de un UAV:** esta arquitectura común esta dirigida a servir de mecanismo de intercambio de mensaje entre procesos. El intercambio es realizado en alto nivel a través de una capa que enruta los mensajes hacia procesos específicos. Las funcionalidades básicas de esta capa son:
 - Define un número dado de mensajes para identificar el tipo de información y el destino de los mensajes.
 - Conmuta entre mensajes y enruta los mensajes dependiendo del tipo de información recibida.

3. **Control visual de un helicóptero autónomo en espacios exteriores:** se han usado técnicas de detección y seguimiento de puntos salientes en la imagen para generar consignas de velocidad en el plano de la imagen. Estas consignas son integradas con el control de vuelo a través de la arquitectura mencionada en el apartado anterior. Con lo cual se ha controlado los desplazamientos laterales, longitudinales y la altura de un vehículo aéreo autónomo.

A pesar de haber sido estudiados diversas aplicaciones y planteamientos, parece evidente que el apartado de robustez en el caso general debe ser considerado como objeto de un análisis intensivo. El planteamiento de control visual propuesto una vez establecidas las restricciones, puede ser extrapolado a numerosas tareas que requieran la localización visual de un UAV relativa a un objeto de interés.

El diseño de aplicaciones de seguimiento encaminadas a resolver problemas prácticos ha demostrado implicar un importante esfuerzo de desarrollo. Para que cualquier aplicación práctica que involucre sistemas de seguimiento pueda ser resuelta satisfactoriamente debe atenderse de forma obligatoria a los muy diversos aspectos implicados como:

- Inicialización en la imagen de los objetos de interés para la aplicación. Aunque en tareas reales no se descarta el uso de interfaces gráficas para una efectiva integración del vehículo aéreo con operarios humanos, el sistema visual debería poseer un grado de autonomía en la detección, presentando al usuario las mejores características visuales, acordes con la tarea, para un seguimiento visual más efectivo.
- Selección de un conjunto de puntos característicos con propiedades adecuadas.
- Implementación de mecanismos y técnicas que incluyan los factores ambientales como parte integral de los algoritmos de procesamiento de imágenes.

- Inclusión de métodos de filtrado que permitan el rechazo de medidas incorrectas y la predicción de los parámetros de seguimiento.
- Definición de mecanismos de detección de errores ocurridos durante el seguimiento y de procedimientos que permitan la recuperación del sistema frente a estas situaciones.
- Considerar la frecuencia de procesamiento de imágenes como un factor relevante a la hora de controlar visualmente un robot aéreo.

Muchas de estas consideraciones han sido tomadas en cuenta a lo largo de los desarrollos, pero sin embargo queda aún ciertos parámetros que son específicos y dependientes de la tarea concreta que se este realizando. Sobre este aspecto algunas ya han sido recogidas en las publicaciones que se han originado del trabajo desarrollado en la tesis, como [Mejias et al., 2005], [Mejias et al., 2006c], [Mejias et al., 2006b] y [Mejias et al., 2006a].

6.2. Futuros Trabajos

El uso de técnicas de visión por computador para el control de vehículo aéreos autónomos ha demostrado ser una tema de gran importancia, que presenta un amplio abanico de aplicaciones que motiva la labor una comunidad científica en el área de visión por computador. Tanto el autor de la tesis como el grupo de investigación al cual pertenece consideran una campo prometedor donde se piensa seguir prestando merecida atención y prestar nuevos esfuerzo para el avance en al autonomía y aplicabilidad de este tipo de plataformas aéreas.

Motivado por los resultados obtenidos durante la labor investigadora que dio lugar a esta tesis doctoral, se proponen como lineas de trabajo futuras:

1. Investigar en las posibilidades de utilizar los detectores de punto característicos para segmentar y reconocer automáticamente objetos en la escena. Un sistema de inspección visual en general podría utilizar

esta información en tareas de reconocimiento de objetos, permitiendo al vehículo robótico más autonomía en tareas de inspección.

2. Integrar la estimación visual de la distancia en la propuesta de control visual actual. Con la estimación de profundidad o seguimiento 3D, pero no solo con respecto a un plano con puntos salientes como se mencionó en el capítulo 5, sino con respecto a los objetos y/o características visuales que se están siguiendo se puede controlar visual los tres grados de libertad en traslación de un UAV.
3. Integrar las técnicas de control visual para vehículos aéreos en un marco global de planificación de trayectorias encaminadas al uso de UAV en aplicaciones reales de inspección.
4. Extender la propuesta a control visual del vehículo al control servo visual de cámaras abordo. En ciertos casos la información visual puede ser oportunamente mejor utilizada para control servo de cámaras, que para el control completo de vehículo. En algunos casos se puede evitar una maniobra de alineamiento del vehículo con respecto a un objeto seguido, con solo una orientación adecuada de la cámara hacia el objetivo.
5. Incorporar los beneficios de cada una de las técnicas que se han mencionado a lo largo de la tesis, en un marco de procesamiento visual más amplio, donde el sistema de visión no solo se encargue de la detección y seguimiento de características para el control visual, sino que al mismo tiempo del análisis visual de la escena se extraiga información útil para la navegación del vehículo, información que pueda sobrellevar la falla u oclusión temporal de alguno de los sensores de navegación. En este sentido la odometría visual y en control visual formarán parte integral de un sistema visual de navegación.

Capítulo 7

Conclusions and Future Work

In this chapter the conclusions and future work about the proposed approaches and the work developed through this dissertation are exposed. We have introduced visual control approaches and image processing techniques which allow an UAV to perform displacement based on image-based velocity references. We have experimentally demonstrated an approach to visually control an autonomous helicopter. Such a capability is very important for aerial robotics. Our algorithm assumes that the UAV can accept lateral, longitudinal and altitude velocity commands and does not depend on the inherent dynamics of the UAV. These final remarks allude as much to general aspect of the developed work and addressed topics, as to the specific aspects of the algorithms and applications of the proposed approaches to real world problems. Also a series of works and topics that are considered of interest for the future are mentioned.

7.1. Conclusions

The field of control and visual navigation has raised an important interest during recent years and continue motivating the research activity of a large UAV community. Considerable part of this activity its been focused on the flight control field, proposing and developing techniques to stabilize and maneuver an autonomous helicopter along a defined trajectory. Nevertheless, the field of visual control of UAVs is in absolute apogee since in recent years the use of UAV for inspection and surveillance task has become greatly popular. This has taken to researcher in the computer vision community to develop techniques that using the information that an UAV acquire through its visual sensors be used to modify the flight path or trajectory according with the visual processing of the scene. In this topic is in which the dissertation has been focused providing with concepts and approaches to visually control an UAV, making contribution as:

1. **Flight control architecture for its integration with visual information:** we have designed a control scheme which allows the integration with external referencial system through a client-server architecture using TCP/UDP messages. The control laws that prevail the flight controller are based on PID control laws. This controller has been experimentally validated and its main behavior was described in chapter 4.
2. **A software architecture for purposeful visual servoing of UAV:** We implement an existing architecture such as client-server. This architecture is based on TCP/UDP messages which allows embedded application to run onboard of an autonomous helicopter. This common architecture is intended to serve as mechanism to exchange messages between processes. The exchange is made through a high level layer which routes the messages to specific processes. Its basic functionalities are:
 - Define a number of messages to identify the type of information

and the destination of these messages. Messages and data structures are defined and then sent to this layer. Different messages for flight control: velocity control, position control, heading, attitude, helicopter state, etc, and for ground processes: type of data sent/received from the ground-based process to/from the onboard vision processes.

- Switch and route the messages depending on the type of information received. For example, the layer can switch between position or velocity control depending on the messages received from an external process.

- 3. Visual Servoing of an unmanned helicopter in outdoor environments:** We employ an onboard camera and a visual processor to sent references to the flight control at a given frequency. These vision-based velocity references are translated into helicopter displacements based on the tracked features. The convergence of the references are validated when the UAV is aligned with the target being tracked. There exist two processing loops running at different frequencies in a decoupled fashion. Different experimental work using several platform detailed in Chapter 5, shows the feasibility of the system and validate our proposal.

In spite of the fact of propose different approaches and techniques, it seems evident that in general terms the robustness should be considered as the main topic for further development and is which should be invested most of the developing efforts. The strategy proposed can be extrapolated to many tasks that require visual servoing for UAV. Such tasks require the vision algorithm to command the UAV towards features of interest when GPS has dropouts (usually in urban areas) or to track a target.

The design of visual application to detect and track features in outdoor environments require an important developing effort in many scopes. So that any practical application which involve the use of visual tracking system performs satisfactory should take into account different aspect as:

- Initialization of interest features. Although in real missions it is not inconceivable the use of ” *user interfaces* ” so that an effective integration of the UAV with humans operators can be made. The visual system should be designed with enough autonomy to show the user the best visual features for an effective tracking.
- Select these salient features with adequate properties according with the task performed.
- Implement techniques and mechanism which takes the environmental factors as integral part of visual processing algorithms.
- Design estimation and filtering methods to rejects incorrect and random measurements when the tracking is carried out.
- Define mechanism to detect errors during tracking and procedures to allow the system to recover from failures in this situations.
- Consider the visual processing rate as relevant factor when visually controlling UAVs.

A number of these factors above introduced has been already mentioned in the experimental developments through this dissertations, however there is still some specific parameters which are closely related with the task being performed. About this matter, some issues has been gathered in the papers which are result of the work developed in this thesis, as [Mejias et al., 2005], [Mejias et al., 2006c], [Mejias et al., 2006b] y [Mejias et al., 2006a].

7.2. Future Work

The use of vision techniques for visual control of an UAV has showed to be an important field in the community, presenting a wide fan of applications which motivates the work of scientist in the field of computer vision. We consider the field of computer vision for UAV a promising area where

we intend to invest further research for the benefit of the autonomy and applicability of these type of aerial platforms.

Motivated for the results obtained during the research work which has produced the thesis, future work directives are proposed:

1. Investigate the possibility of use feature detectors to segment and recognize autonomously interest objects in the scene. The visual system might use this information in inspection tasks, allowing the robotic vehicle to perform with better autonomy.
2. Integrate the visual estimation of the depth with the visual control approach proposed. With a 3D estimation or distance estimation to the objects is possible to control the translation of an UAV in 3DOF.
3. Integrate the visual control approach in a global path and trajectory planning framework in order to perform real inspection tasks.
4. Expand the UAV visual control approach to visual servoing the on-board cameras. In certain tasks the visual information can be conveniently used to control the cameras and not the entire UAV. In cases, certain aligning maneuvers of the UAV might be avoided just with the proper camera orientation.
5. Incorporate the goodness of the different visual application in a wider framework in which a complete visual system is used not only for detection and tracking of features, but simultaneously the system can recover navigational information (act as visual odometer) useful in cases in which other navigational sensor has failures or dropouts. In that sense visual odometry and visual servoing will be part of an integral visual system.

Apéndice



Definiciones generales

Para una mejor comprensión de los términos usados en el presente trabajo. A continuación se definen e ilustran una serie de conceptos usados en el campo de los helicópteros:

Rotor: es el sistema de giro en torno del eje común en el helicóptero.

Palas del rotor: se definen como las alas rotatorias con perfiles específicos que producen un plano de sustentación.

Rotor de cola: es el rotor ubicado en la cola del helicóptero.

Velocidad angular: es la velocidad angular obtenida de la rotación de la pala.

Perfil: superficie especialmente diseñada que por su curvatura produce sustentación cuando se mueve a través de una masa de aire.

Fuerza aerodinámica total: es el vector resultante de todas las fuerzas creadas en un perfil, debido a las distribuciones de presiones de aire a su alrededor.

Centro de presión: es el punto teórico situado en la línea de referencia donde se considera que se aplica la fuerza aerodinámica.

Centro de masas: es el punto teórico donde se considera aplicada la resultante de todos los pesos que actúan sobre el helicóptero.

Resistencia: es la suma de todas las fuerzas que se oponen al avance.

Resistencia inducida: componente de la fuerza aerodinámica opuesta a la dirección del movimiento del perfil.

Actitud: define como se encuentra dispuesto el helicóptero en el espacio. Se refiere al conjunto de ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada del helicóptero en un momento determinado.

Alabeo (Roll): es el ángulo Φ creado por el movimiento del helicóptero cuando éste gira en torno al eje horizontal (eje X). Ver Figura A.1

Cabeceo (Pitch): es el ángulo Θ creado por el movimiento del helicóptero cuando éste gira en torno al eje latitudinal (eje Y). Ver Figura A.1

Guiñada (Yaw): es el ángulo ψ creado por el movimiento del helicóptero cuando éste gira en torno al eje vertical (eje Z). Ver Figura A.1

Ángulo de ataque: es el ángulo creado entre la línea de referencia de la pala y la resultante del viento relativo que incide sobre la pala. Al variar el ángulo de ataque se obtiene sustentación. ver figura A.2

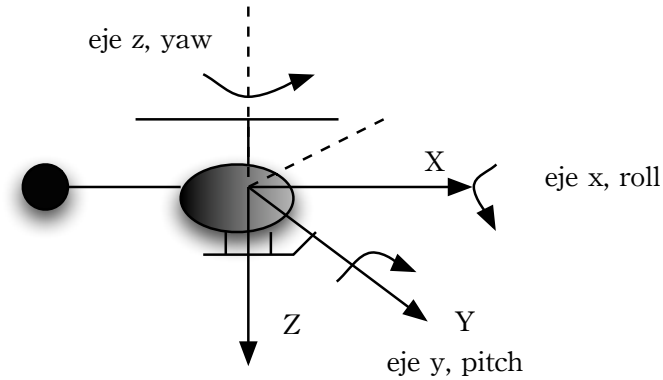


Figura A.1: Ejes de referencia del helicóptero

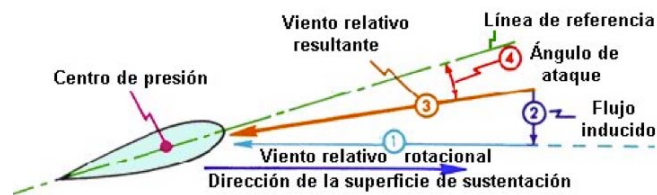


Figura A.2: Ángulo de ataque

Ángulo de cabeceo de las palas del rotor principal: se define como el ángulo en que las palas del rotor principal rotan en torno a su propio eje longitudinal. Este ángulo permite al helicóptero elevarse cuando la velocidad angular del rotor permanece constante. El ángulo de cabeceo es la suma del cabeceo colectivo y del cabeceo cíclico. ver figura A.3

Plato controlador: es un plato mecánico ubicado debajo del rotor. El disco controlador se encuentra unido a las palas y a los servos de control, permite variar el ángulo de cabeceo de las palas del rotor. ver figura A.4

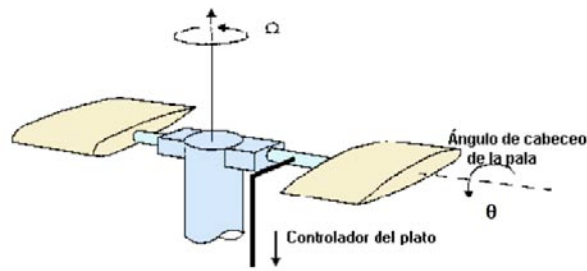


Figura A.3: Ángulo de cabeceo de las palas del rotor principal

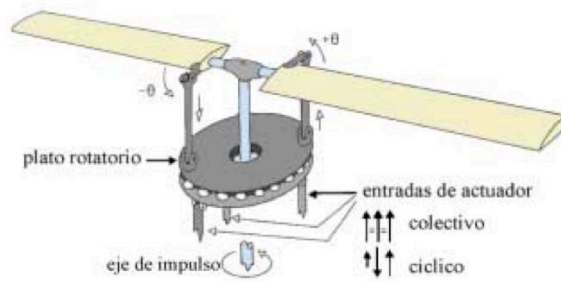


Figura A.4: Plato controlador

Paso Colectivo: es el ángulo requerido por las palas del rotor principal para producir un movimiento contrario al sentido de la fuerza de gravedad y mantener la velocidad vertical del helicóptero constante. Se utiliza para controlar los movimientos de subir y bajar del helicóptero. En la Figura A.5 se muestra el paso colectivo de la pala, al subir y bajar las varillas se modifica colectivamente el ángulo de incidencia de las dos palas del rotor.

Paso Cíclico: se define como el ángulo en que las palas del rotor principal varían en una revolución creando una fuerza de levantamiento no unifor-

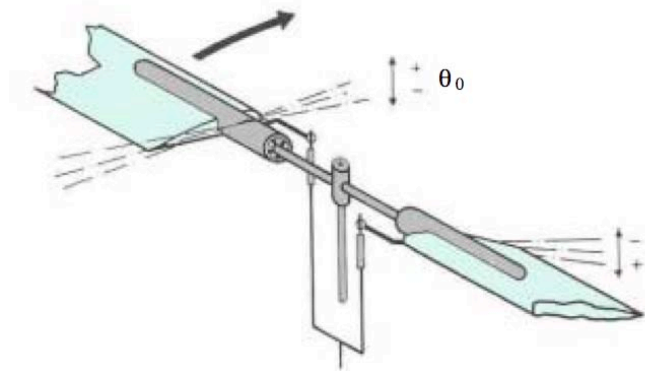


Figura A.5: Paso colectivo

me en el área del rotor. Permite los movimientos de alabeo (cíclico lateral) y cabeceo (cíclico longitudinal) del helicóptero. El ángulo de incidencia de la pala del rotor varía en cada momento en el curso de una revolución en consonancia con la inclinación del plato rotatorio. Al inclinar el plato rotatorio en una dirección determinada, las palas del rotor variarán cíclicamente su ángulo de incidencia en cada revolución hasta llegar a adoptar la inclinación del plato rotatorio.

Sistema de referencias del helicóptero: Sistema de referencias que tiene su origen en el centro de masas del helicóptero y que tiene su eje x alineado con el eje longitudinal del helicóptero. El eje y es transversal al eje lateral del helicóptero y el eje z . Figura A.7

Sistema de coordenadas NED: De sus siglas en inglés, Noth, East, Down. Dicho sistema es un sistema local usado para navegar y referido a un punto fijo local, por lo general tiene origen en el centro de gravedad del vehículo. El eje N es paralelo a la superficie geodésica y mira hacia el polo Norte. El eje E es paralelo a la superficie geodésica y apunta al Este haciendo una curva sobre la latitud y finalmente, el eje D es normal a la

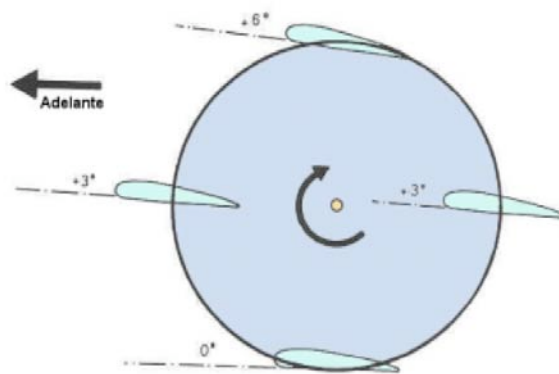


Figura A.6: Paso cíclico

superficie geodésica y apunta hacia el centro del globo terrestre. Figura A.8.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Sistema de Posicionamiento Global el cual permite determinar en todo el mundo la posición de una persona, un vehículo o una nave, con una precisión de entre cuatro metros y quince metros. El GPS funciona mediante una constelación de 24 satélites artificiales uniformemente distribuidos en un total de 6 órbitas, de forma que hay 4 satélites por órbita. Esta configuración asegura que siempre puedan *verse* al menos 8 satélites desde casi cualquier punto de la superficie terrestre. Los satélites GPS orbitan la Tierra a una altitud de unos 20.000 km y recorren dos órbitas completas cada día. Describen un tipo de órbita tal que *salen* y se *ponen* dos veces al día. Cada satélite transmite señales de radio a la Tierra con información acerca de su posición y el momento en que se emite la señal. Podemos recibir esta información con receptores GPS(receptores GPS), que decodifican las señales enviadas por varios satélites simultáneamente y combinan sus informaciones para calcular su propia posición en la Tierra, es decir sus coordenadas de latitud y longitud (latitud y longitud) con una precisión de unos 4-10 metros.

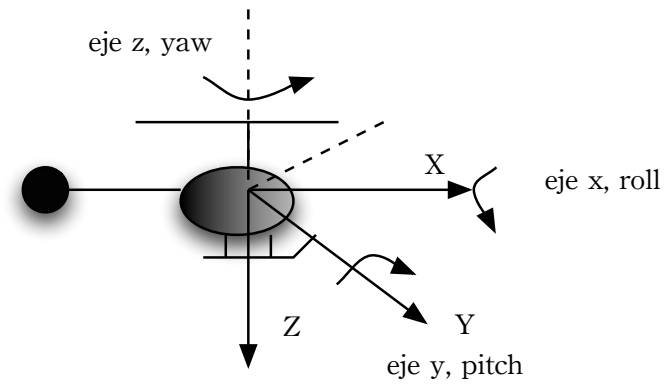


Figura A.7: Sistema de coordenadas del helicóptero

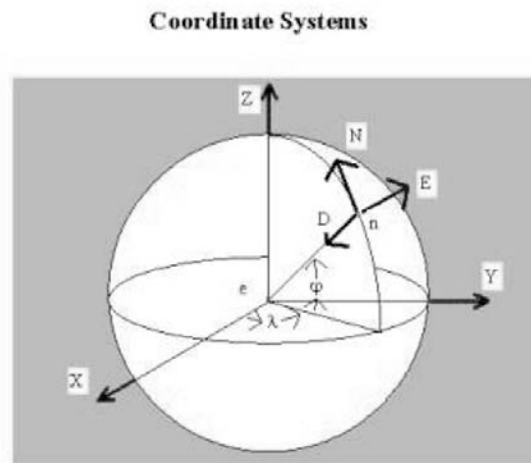


Figura A.8: Sistema de coordenadas NED

Unidad de Medida Inercial (IMU): Unidad de medida inercial es el nombre dado al conjunto de sensores que aportan información sobre la aceleración y ángulos de orientación del sistema. Los sensores más comúnmente empleados son acelerómetros y giróscopos. La disposición de los acelerómetros son ortogonales entre ellos, de manera similar se disponen los giróscopos.

Gradient descent (ascent) es un algoritmo de optimización que toma los mínimos locales de una función en un punto, en pasos que son proporcionales a el negativo del gradiente (o su aproximación) de la función este punto. Si en lugar se toman pasos proporcionales a el gradiente y se usan los máximos locales, el procedimiento se denomina **Gradient ascent**.

Apéndice B

Desarrollo matemático del modelo dinámico de la cámara

Basándonos la configuraciones mostradas en la figuras B.1 y B.2. La cámara con su sistema de coordenadas C , la imagen cuyo sistema coordenadas (i, j) tiene su origen en la esquina superior izquierda y el punto $P^c(x^c, y^c, z^c)$ expresado en el sistema de coordenadas de la cámara, cuya proyección en el plano de la imagen es (i, j) (ecuación 3.5). Asumamos que la cámara se mueve con velocidad $V = (v_x^c, v_y^c, v_z^c)$ y velocidad angular $\omega = (w_x, w_y, w_z)$.

Dada estas configuraciones la velocidad del punto P^c puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\dot{P}^c = -(V + \omega \times P^c) \quad (\text{B.1})$$

El signo menos indica que la cámara esta en movimiento y el punto estático. Desarrollando la ecuación B.1 se tiene:

$$\dot{x}^c = -(v_x^c + \omega_z y_c - \omega_y z_c) \quad (\text{B.2})$$

$$\dot{y}^c = -(v_y^c + \omega_z x_c - \omega_x z_c) \quad (\text{B.3})$$

$$\dot{z}^c = -(v_z^c + \omega_x y_c - \omega_y x_c) \quad (\text{B.4})$$

Por otro lado la velocidad en el plano de la imagen del punto P puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\dot{i} = \frac{f}{x_c^2} (x_c \dot{y}_c - \dot{x}_c y_c) \quad (\text{B.5})$$

$$\dot{j} = \frac{f}{x_c^2} (x_c \dot{z}_c - \dot{x}_c z_c) \quad (\text{B.6})$$

Sustituyendo las ecuaciones B.2, B.3 y B.4 en las ecuaciones B.5 y B.6, se tiene:

$$\dot{i} = \frac{f}{x_c^2} [x_c (-v_y^c - \omega_z x_c) - y_c (-v_x^c - \omega_z y_c + \omega_y z_c)] \quad (\text{B.7})$$

$$\dot{j} = \frac{f}{x_c^2} [x_c (-v_z^c + \omega_y x_c) - z_c (-v_x^c - \omega_z y_c + \omega_y z_c)] \quad (\text{B.8})$$

Haciendo operaciones y re-ubicando algunos términos se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\dot{i} = -\frac{f}{x_c} [v_y^c + \omega_z x_c - \omega_x \frac{x_c}{f} (j - C_j)] + \frac{(i - C_i)}{x_c} [v_x^c + \frac{x_c}{f} (\omega_z (i - C_i) - \omega_y (j - C_j))] \quad (\text{B.9})$$

$$\dot{j} = -\frac{f}{x_c} [v_z^c + \omega_x \frac{x_c}{f} (i - C_i) - \omega_y x_c] + \frac{(j - C_j)}{x_c} [v_x^c + \frac{x_c}{f} (\omega_z (i - C_i) - \omega_y (j - C_j))] \quad (\text{B.10})$$

Finalmente se tienen las ecuaciones de movimiento de la cámara en función de la velocidad y posición de la característica en la imagen. Expresando las ecuaciones anteriores de otra forma tenemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i-C_i}{x_c} & -\frac{f}{x_c} & 0 & j-C_j & \frac{(i-C_i)(j-C_j)}{f} & \frac{(i-C_i)^2}{f} - f \\ \frac{j-C_j}{x_c} & 0 & -\frac{f}{x_c} & -(i-C_i) & f - \frac{(j-C_j)^2}{f} & \frac{(i-C_i)(j-C_j)}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^c \\ v_y^c \\ v_z^c \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

Aplicando las restricciones definidas en la sección 3.5, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{j} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{f}{x_c} & 0 \\ 0 & \frac{f}{x_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y^c \\ v_z^c \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

Dadas las dos configuraciones mostradas en las figuras anteriores (B.1 y B.2), la relación entre las velocidades de la cámara y el sistema de coordenadas del helicóptero viene dada por:

configuración 1: cámara en la parte frontal del helicóptero y mira hacia el frente. Control de velocidad vertical y lateral.

$$v_y = v_y^c \quad (\text{B.13})$$

$$v_z = v_z^c \quad (\text{B.14})$$

configuración 2: cámara en la parte inferior del helicóptero y mira hacia abajo. Control de velocidad lateral y longitudinal.

$$v_x = -v_z^c \quad (\text{B.15})$$

$$v_y = v_y^c \quad (\text{B.16})$$

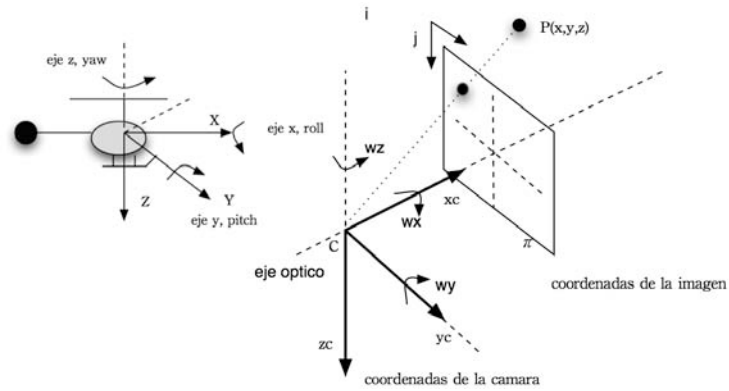


Figura B.1: Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico. Cámara colocada en la parte frontal del helicóptero y mira al frente

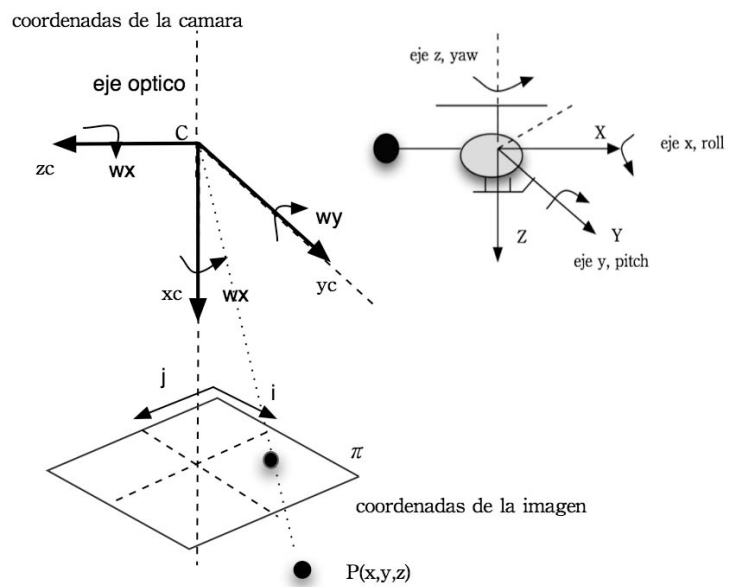
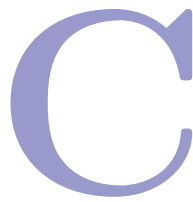


Figura B.2: Disposición del modelo de la cámara para el modelado dinámico. Cámara colocada sobre el centro de masa del helicóptero y mira hacia abajo

Apéndice



Valores de las estructuras de datos usadas para intercambiar mensajes entre procesos

A continuación se muestran los mensajes y estructuras de datos que son usadas para intercambiar información entre el control de vuelo y procesos de visión.

Estado general del helicóptero

```
typedef struct {  
    /* Euler angles relative to the ground */  
    double phi;  
    double theta;  
    double psi;  
    /* Body frame rotational rates */  
    double p;
```

```

double q;
double r;
/* Position relative to the ground */
double x;
double y;
double z;
/* Velocity over the ground */
double vx;
double vy;
double vz;
/* Raw magnetometer readings */
double mx;
double my;
double mz;
/* Body frame linear accelerations */
double ax;
double ay;
double az;
/* raw body frame rotational rates */
double raw_p;
double raw_q;
double raw_r;
/* Miscellaneous */
double trace; /* AHRS trace 0 ¡t ¡10 is good */
double voltage; /* IMU bus voltage 4.9-5.1 is good */
uint16_t resets; /* Should never change */
uint16_t rpm0;
uint16_t rpm1;
uint16_t rpm2;
} state_t;

```

Valores de los comandos enviados por la emisora (vuelo manual) a los servos

```
typedef struct {
```

Apéndice C. Valores de las estructuras de datos usadas para intercambiar mensajes entre procesos

```
uint16_t valid; /* Bit mask of the servos */
uint16_t roll;
uint16_t pitch;
uint16_t throttle;
uint16_t yaw;
uint16_t yaw_gain;
uint16_t coll;
uint16_t mode;
uint16_t extra1;
uint16_t extra2;
uint16_t manual;
uint16_t idle;
uint16_t gyro_gain;
uint16_t crc_err;
uint16_t qos;
uint16_t mask;
} ppm_t;
```

Estado general del helicóptero durante el vuelo autónomo. Valores deseados del autopiloto para la variables.

```
typedef struct {
int16_t manual;
int16_t mode;
/* The current desired point */
double n;
double e;
double d;
/* The current desired angle */
double phi;
double theta;
double psi;
/* Servo commands */
```

```
uint16_t roll;
uint16_t pitch;
uint16_t yaw;
uint16_t roll;
uint16_t throttle;
uint16_t pad0;
double vx;
double vy;
double vz;
double p;
double q;
double r;
} msg_autopilot_state_t;
```

```
typedef struct {
uint16_t gps_status;
uint16_t radio_status;
uint16_t ahrs_status;
uint16_t takeoff_status;
uint16_t autopilot_status;
uint16_t unused_state;
} afcs_state_t;
```

Lecturas del GPS

```
typedef struct {
int16_t numsv;
int16_t sacc;
int16_t pacc;
int16_t fixtype;
double vel_n;
double vel_e;
double vel_d;
```


Apéndice C. Valores de las estructuras de datos usadas para intercambiar mensajes entre procesos

```
double pos_n;  
double pos_e;  
double pos_d;  
double raw_pos_n;  
double raw_pos_e;  
double raw_pos_d;  
double trace;  
} msg_gps_t;
```

Modo de control de posición

```
typedef struct {  
int16_t pos_mode;  
int16_t hdg_mode;  
int16_t transit_time;  
uint16_t pad1;  
double x;  
double y;  
double z;  
double hdg;  
} msg_flyto_t;
```

Modo control de velocidad

```
typedef struct {  
double fore;  
double side;  
double alt;  
double hdg;  
} msg_teleop_t;
```

Valores deseados de los angulos de actitud

```
typedef struct {  
    /* "Zero.angle" */  
    double phi;  
    double theta;  
    double psi;  
    /* "Zero" stick positions */  
    uint16_t roll;  
    uint16_t pitch;  
    uint16_t yaw;  
} msg_desired_angle_t;
```

```
typedef struct {  
    int16_t n0;  
    int16_t n1;  
    int16_t n0_desired;  
    int16_t pad0;  
    int16_t fadec0;  
    int16_t fadec1;  
    int16_t fadec2;  
    int16_t fadec3;  
    double bat_volts;  
    double a_volts;  
    double a_amps;  
    int16_t a0;  
    int16_t a1;  
    int16_t a2;  
    int16_t a3;  
    double b_volts;  
    double b_amps;  
    int16_t b0;  
    int16_t b1;  
    int16_t b2;  
    int16_t b3;
```

Apéndice C. Valores de las estructuras de datos usadas para intercambiar mensajes entre procesos

```
} fadec_t;
```

Define o lee la posición y orientación al autopiloto

```
typedef struct{  
double n;  
double e;  
double d;  
double hdg;  
} msg_desired_pos_t;
```

Define o lee las ganancias del controlador para un eje

```
typedef struct {  
double p;  
double i;  
double d;  
} msg_gain_t;
```

```
typedef struct {  
uint16_t pos_mode;  
uint16_t hdg_mode;  
uint16_t transit_time;  
uint16_t timeout;  
uint16_t x;  
uint16_t y;  
uint16_t z;  
uint16_t hdg;  
} msg_failsafe_t;
```

Define los valores enviados a los procesos externos sobre el estado del procesamiento visual

```
typedef struct {
int16_t loci;
int16_t locj;
double vel_x;
double vel_y;
double vel_z;
double pos_x;
double pos_y;
double pos_z;
} msg_vision_out_t;
```

Define los valores recibidos de los procesos externos para controlar el procesamiento y parametros de la cámara

```
typedef struct {
int16_t reset;
int16_t detect;
int16_t cx;
int16_t cy;
int16_t save;
double t_hue;
double t_sat;
double t_val;
double t_exposure;
double t_shutter;
double t_gain;
double camera_feature;
double value;
} msg_vision_in_t;
```

Bibliografía

- ActivMedia (2006). Mobile robots. activmedia robotics.
<http://www.activmedia.com/>.
- Altuğ, E. (2003). *Vision Based Control of Unmanned Aerial Vehicles with Applications to an Autonomous Four Rotor Helicopter*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania.
- Altuğ, E., Ostrowski, J. P., and Taylor, C. J. (2005). Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback. *International Journal of Robotics Research*, 24(5):329–341.
- Amidi, O. (1996). *An Autonomous Vision-Guided Helicopter*. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., and Clapp, T. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2):174–188.
- Arun, K., Huant, T., and Blostein, S. D. (1987). Least-squares fitting of two 3-d point sets. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9:698–700.
- Ashbrook, A. P. (December. 1992). Evaluations of the susan corner detection algorithm. Technical report, Electronic System group. Department of Electronic and Electrical Engineering. University of Sheffield., UK.

- AVATAR (2005). University of Southern California Autonomous Flying Vehicle Homepage. <http://www-robotics.usc.edu/~avatar>.
- Azarbayejani, A. and Pentland, A. (1995). Recursive estimation of motion, structure and focal length. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17:562–575.
- BEAR (2006). University of California at Berkeley. BErkeley AeRobot Project. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/bear>.
- Beaudet, P. R. (1978). Rotational invariant image operators. In *In Proceedings of the 4th International Conference on Pattern Recognition*, pages 579–583.
- Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). Susan- a new approach to low level image processing. *IEEE Transactions Patterns Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):139–256.
- Borenstein, J., Everett, B., and Feng, L. (1996). *Navigating mobile robots systems and techniques*. A. K. Peters. Ltd.
- Bosse, M. (1997). A vision augmented navigation system for an autonomous helicopter. Master’s thesis, Boston University.
- Broida, T. J., Chandra, S., and Chellappa, R. (1990). Recursive techniques for estimation of 3-d translation and rotation parameters from noisy image sequences. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26:639–656.
- Caballero, F., Merino, L., Ferruz, J., and Ollero, A. (2005). A visual odometer without 3d reconstruction for aerial vehicles. applications to building inspection. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4684–4689, Barcelona, Spain.

BIBLIOGRAFÍA

- Caballero, F., Merino, L., Ferruz, J., and Ollero, A. (2006). Improving vision-based lanar motion estimation for unmanned aerial vehicles through online mosaicing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2860–2865, Orlando, Florida.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, 8(6):679–698.
- Causey, R. S. (2003). A lateral vision-based control autopilot for micro air vehicles using a horizon detection approach. Master’s thesis, University of Florida. Depart. of Mechanical and Aerospace Engineering.
- Civita, M. L. (2003). *Integrated Modeling and Robust Control for Full-Envelope Flight of Robotic Helicopters*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- COLIBRI (2005). Universidad Politécnica de Madrid. Computer Vision Group. COLIBRI Project. <http://www.disam.upm.es/colibri>.
- Collins, R. T. and Liu, Y. (2003). On-line selection of discriminative tracking features. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 1, pages 346–352.
- Conway, A. R. (1995). *Autonomous Control of an Unstable Helicopter Using Carrier Phase GPS Only*. PhD thesis, Stanford University.
- Corke, P., Roberts, J., and Buskey, G. (2002). Low-cost flight control system for a small autonomous helicopter. In *In Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation*, pages 71–76, Auckland, New Zealand.
- Corke, P., Sikka, P., and Roberts, J. (2000). Height estimation for an autonomous helicopter. In *Proc.Int.Symp. Experimental Robotics*, Hawaii.
- Corke, P., Sikka, P., Roberts, J., and Duff, E. (2004a). ddx: A distributed software architecture for robotic systems. In *Proc. Australian Conf. Robotics and Automation*, Canberra, Australia.

- Corke, P., Strelow, D., and Singh, S. (2004b). Omnidirectional visual odometry for a planetary rover. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Japan.
- Cucchiara, R. and Fillicori, F. (1998). The vector-gradient hough transform. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, 20:746–750.
- Douglas, D. H. and Peucker, T. K. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 10(2):112–122.
- Dunbabin, M., Usher, K., and Corke, P. (2005). visual motion estimation for an autonomous underwater reef monitoring. In *Field and service robotics conference*, pages 57–68, Port Douglas, Qld.
- Eggert, D., Larusso, A., and Fisher, R. (1997). Estimating 3-d rigid body transformation: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, 9(5-6):272–290.
- ELEVA (2005). Universidad Politécnica de Madrid. Computer Vision Group. ELEVA Project. <http://www.disam.upm.es/~vision/eleva/index.html>.
- Forsyth, D. A. and Ponce, J. (2002). *Computer Vision: A Modern Approach*. Prentice Hall.
- Garcia, M. (2004). Calibración de un sistema. Master’s thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.
- Garcia-Pardo, P. J., S.Sukhatme, G., and Montgomery, J. F. (2001). Towards vision-based safe landing for an autonomous helicopter. *Robotics and Autonomous Systems*, 38(1):19–29.

BIBLIOGRAFÍA

- Gavrilets, V. (2003). *Autonomous Aerobatic Maneuvering of Miniature Helicopters: Modeling and Control*. PhD thesis, School of Aeronautics and Astronautics.
- Gavrilets, V., Martinos, I., Mettler, B., and Feron, E. (2002). Control logic for automated aerobatic flight of miniature helicopter. In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, number AIAA 2002-4834, Monterey, CA, USA. AIAA.
- Gil, I. A. (2000). *Identificación y Control de un Minihelicóptero en Vuelo Etacionario*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Hager, G. D. and Belhumeur, P.Ñ. (1998). Efficient region tracking with parametric region tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20:1025–1039.
- Harris, C. G. and Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detection. In *In Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, pages 147–151.
- Horn, B. K. P. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A.*, 4(4):629–642.
- Horn, B. K. P., Hilden, H. M., and Negahdaripour, S. (1988). Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices. *Journal of the Optical Society of America A.*, 5(7):1127.
- Hrabar, S. E. (2006). *Vision-Based 3D Navigation for an Autonomous Helicopter*. PhD thesis, University of Southern California.
- Hutchinson, S., Hager, G. D., and Corke, P. (1996). A tutorial on visual servo control. In *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, volume 12(5), pages 651–670.
- Illingworth, J. and Kittler, J. (1997). The adaptive hough transform. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, 9:690–697.

- Isard, M. and Blake, A. (1998). Condensation - conditional density propagation for visual tracking. *International Journal of Computer Vision*, 29(1):5–28.
- Jepson, A. D., Fleet, D. J., and El-Maraghi, T. F. (2003). Robust online appearance models for visual tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(10):1296–1311.
- Johnson, A., Montgomery, J. F., and Matthies, L. (2005). Vision guided landing of an autonomous helicopter in hazardous terrain. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3977–3982.
- Johnson, W. (1980). *Helicopter Theory*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans ASME*, 82(D):35–45.
- Kass, M., Witkin, A., and terzopoulos, D. (1988). Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1(4):321–331.
- Kim, B. S. and Calise, A. J. (1997). Nonlinear flight control using neural networks. *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 20(1):26–33.
- Kim, H. J., Shim, D., and Sastry, S. (2003). A flight control system for aerial robots: Algorithms and experiments. *IFAC Journal of Control Engineering Practice*, 11:1389–1400.
- Kim, N. (2003). *Improved Methods in Neural Network-Based Adaptive Output Feedback Control, with Applications to Flight Control*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332.
- Kitchen, L. and Rosenfeld, A. (1982). Gray level corner detection. *Pattern recognition letters*, 1(2):95–102.

BIBLIOGRAFÍA

- Lee, S. (2001). *Neural Network based Adaptive and its applications to Aerial Vehicles*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332.
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2:164–168.
- Lowe, D. G. (1991). Fitting parametrized three-dimensional models to images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(5):441–450.
- Lucas, B. D. and Kanade, T. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proc. of the 7th IJCAI*, pages 674–679, Vancouver, Canada.
- Mahony, R. and Hamel, T. (2005). Image-based visual servo control of aerial robotic systems using linear image features. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):227–239.
- Mallet, A., Lacroix, S., and Gallo, L. (2000). Position estimation in outdoor environment using pixel tracking and stereovision. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3519–3524, San Francisco, CA, USA.
- Marquart, D. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 11:431–441.
- Martin, J. and Crowley, J. (1995). Experimental comparison of correlation techniques. Technical report, IMAG-LIFIA, 46 Av. Félix Viallet 38031 Grenoble, France.
- Mataric, M. J. (1997). Behavior-based control: Examples from navigation, learning and group behavior. *Journal of experimental and theoretical artificial intelligence, special issue on software architecture for physical agents*, 9(23):67–83.

- Matthies, L. (1989). *Dynamic stereo vision*. Cmu-cs-89-195, Carnegie Mellon University. Computer Science Department.
- Matthies, L. and Shafer, S. (1987). Error modeling in stereo navigation. *IEEE Journal of robotics and automation*, RA-3(3):239–250.
- Mejias, L., Roberts, J., Campoy, P., Usher, K., and Corke, P. (2006a). Two seconds to touchdown. vision-based controlled forced landing. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, page to appear, Beijing, China.
- Mejias, L., Saripalli, S., Campoy, P., and Sukhatme, G. (2006b). Visual servoing approach for tracking features in urban areas using an autonomous helicopter. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2503–2508, Orlando, Florida.
- Mejias, L., Saripalli, S., Campoy, P., and Sukhatme, G. (2006c). Visual servoing of an autonomous helicopter in urban areas using feature tracking. *Journal Of Field Robotics*, 23(3-4):185–199.
- Mejias, L., Saripalli, S., Sukhatme, G., and Campoy, P. (2005). Detection and tracking of external features in a urban environment using an autonomous helicopter. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3983–3988.
- Merz, T., Duranti, S., and Conte, G. (2004). Autonomous landing of an unmanned helicopter based on vision and inertial sensing. In *International Symposium on Experimental Robotics*, Singapore.
- Milella, A. and Siegwart, R. (2006). Stereo-based ego-motion estimation using pixel tracking and iterative closest point. In *Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, page 21. IEEE Computer Society Washington, DC, USA.
- Montgomery, J. F. (1999). *Learning Helicopter Control Through 'teaching by showing'*. PhD thesis, University of Southern California, Los Angeles, CA.

BIBLIOGRAFÍA

- Montgomery, J. F. (2000). The use autonomous flying vehicle (afv) project: Year 2000 status. Technical Report IRIS-00-390, Institute for Robotics and Intelligent Systems Technical Report, Los Angeles, CA 90089-0273.
- Moravec, H. P. (1977). Towards automatic visual obstacle avoidance. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, page 584.
- Nardi, F. (2000). *Neural Network based Adaptive Algorithms for Nonlinear Control*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Atlanta, GA 30332.
- Nesnas, I. A. D., Bajaracharya, M., Madidson, R., Bandiari, E., Kunz, C., Deans, M., and Bualat, M. (2004). Visual target tracking for rover-based planetary exploration. In *Proceedings of the 2004 IEEE aerospace conference*, Big Sky, Montana. USA.
- Nistér, D., naroditsky, O., and Bergen, J. (2004). Visual odometry. In *Proceedings IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, volume 1, pages 652–659.
- Noble, A. (1989). *Description of image surfaces*. PhD thesis, Department of Engineering Science. Oxford University.
- Ojeda, L., Reina, G., and Borenstein, J. (2004). Experimental results from flexnav: An expert rule-based dead-reckoning system for mars rovers. In *Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE*, volume 2, pages 816–825.
- Olson, C. (2000). Maximum-likelihood template matching. In *Proceedings of the IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 52–57.
- OpenCV (2001). <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>. Open Source Computer Vision Library OpenCV.

- P. V. C. Hough (1962). A Method and Means for Recognizing Complex Patterns. US Patent: 3,069,654.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., and Vetterling, W. T. (2002). *Numerical recipes in c*. Cambridge University Press.
- Prouty, R. W. (1990). *Helicopter Performance, Stability and Control*. Robert E. Kreiger Publishing.
- Quevedo, M. A. C. (2000). *Un enfoque bayesiano para la extracción de características y agrupamiento en visión artificial*. PhD thesis, Universidad de Alicante.
- Roberts, J. M. (1994). *Attentive visual tracking and trajectory estimation for dynamic scene segmentation*. PhD thesis, University of Southampton.
- Roumeliotis, S. I., Johnson, A., and Montgomery, J. F. (2002). Augmentation inertial navigation with image-based motion estimation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4326–4333, Washington D.C.
- Sanderson, A. C. and Weiss, L. E. (1983). Adaptative visual servo control of robots. In *Robot Vision (A. Pugh, ed)*, pages 107–116.
- Saripalli, S., Montgomery, J. F., and Sukhatme, G. S. (2003a). Visually-guided landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(3):371–381.
- Saripalli, S., Roberts, J. M., Corke, P. I., Buskey, G., and Sukhatme, G. S. (2003b). A tale of two helicopters. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, USA.
- Shakernia, O., Ma, Y., Koo, T. J., and Sastry, S. S. (1999). Landing an unmanned air vehicle: vision based motion estimation and non-linear control. In *Asian Journal of Control*, volume 1, pages 128–145.

BIBLIOGRAFÍA

- Shi, J. and Tomasi, C. (1994). Good features to track. In *1994 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, pages 593–600.
- Shim, H. (2000). *Hierarchical Flight Control System Synthesis for Rotorcraft-based Un- manned Aerial Vehicles*. PhD thesis, University of California, Berkeley.
- Shim, H., Koo, T. J., Hoffmann, F., and Sastry, S. (1998). A comprehensive study of control design for an autonomus helicopter. In *Proceedings of IEEE Conference on Desicion and Control*, volume 4, pages 3653–3658, Tampa, Florida. US.
- Smith, S. M. (1992). A new class of corner finder. In *In proceedings of the British Machine Vision Conference*, pages 139–148.
- Smith, S. M. and Brady, J. M. (1997). Susan- a new approach to low level image processing. *International Journal of Computer Vision*, 23(1):45–78.
- Sugeno, M., Winston, H., Hirano, I., and S.Kotsu (1995). Intel ligent control of an un- manned helicopter based on fuzzy logic. In *American Helicopter Society 51st An- nual forum Proceedings*, pages 791–803, Houston.
- Tomasi, C. and Kanade, T. (1993). Shape and motion from image streams - a factorization method. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 90(21):9795–9802.
- UAVRF (2006). Georgia Institute of Tecnology. UAV Research Facility. <http://controls.ae.gatech.edu/uavrf/>.
- Ullman, S. (1979). *The interpretation of visual motion*. MIT Academic Press.

- Usher, K., Winstanley, G., Corke, P., Stauffacher, D., and Carnie, R. (2005). Air vehicle simulator: an application for a cable array robot. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2253–2258, Barcelona, Spain.
- Walker, M. W., Shao, L., and Volz, R. A. (1991). Estimating 3-d location parameters using dual number quaternions. *CVGIP: Image Understanding*, 54(3):358–367.
- Yue, A. and Postlethwaite, J. (1990). Improvement of helicopter handling qualities using hinf optimization. In *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, volume 137(3), pages 115–129.
- Zhang, H. (2000). *Motion Control for Dynamic Mobile Robots*. PhD thesis, University of Pennsylvania.